



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# PILOT- KUIVAMÄDÄTYSLAITTEISTON SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN

TEKIJÄ: Juha Hämäläinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Juha Hämäläinen	
Työn nimi Pilot-kuivamädätyslaitteiston suunnittelu ja rakentaminen	
Päiväys 29.04.2020	Sivumäärä/Liitteet 54/6
Ohjaaja(t) Miika Kahelin, Pasi Pajula	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Insect Savo –hanke	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyössä suunniteltiin ja rakennettiin Savonia-ammattikorkeakoululle testikäyttöön liikuteltava kuivamädätyslaitteisto. Laitteistolla tullaan testaamaan erilaisten biomassojen metaanintuottopotentiaalia. Kuivamädätysprosessin mädätysjäännöksen soveltuvuutta hyönteisten kasvatuksessa tullaan testaamaan. Työ toteutettiin osana Insect Savo –hanketta, jonka tavoitteena on lisätä hyönteisalan osaamista Pohjois-Savossa, luoda uutta kysyntää hyönteisille ja niistä jalostetuille tuotteille sekä kehittää hyönteistuotantoketjua kestäväan ja kannattavaan suuntaan.</p> <p>Kehittämistyö alkoi kuivamädätyslaitteiston suunnitteluun tarvittavan kirjallisen materiaalin hankinnalla. Suunnittelun pohjaksi kerättiin tietoa biokaasuprosessista, biokaasukokeista sekä olemassa olevista laitteistoista. Kerättyä taustamateriaalia hyödyntäen laadittiin vaatimukset kehitettävälle laitteistolle. Laitteistovaatimusten pohjalta suunniteltiin AutoCAD-ohjelmistolla vaihtoehtot rakennettavaksi kuivamädätyslaitteistoksi. Suunnitelluista vaihtoehtoista valittiin laitteistolle suunnitelma, joka täytti parhaiten laitteistolle asetetut tavoitteet.</p> <p>Kuivamädätyslaitteistoon tarvittavista osista ja niiden hankinnasta tehtiin selvitys. Selvityksen pohjalta muokattiin laitteistosuunnitelmaa. Suunnitelman valmistuttua hankittiin laitteistoon tarvittavat osat. Laitteisto rakennettiin Savonia-ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan pajalla ja sijoitettiin ympäristötekniikan laboratorioon. Laitteiston toimivuutta testattiin ja sillä tehtiin koeajoja. Laitteistoa muutettiin testeistä saatujen kokemusten perusteella.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena rakennettiin biomassojen käsittelyyn soveltuva kuivamädätyslaitteisto. Työn tuloksen tehtiin myös laitteiston AutoCAD-piirokset, prosessikaavio sekä laitteiston käyttö- ja turvallisuusohjeet.</p>	
Avainsanat	
kuivamädätyslaitteisto, biokaasu, koelaitteisto, anaerobinen hajoaminen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Juha Hämäläinen			
Title of Thesis Designing and Construction of a Pilot scale Dry Digester			
Date	29.04.2020	Pages/Appendices	54/6
Supervisor(s) Miika Kahelin, Senior Lecturer and Pasi Pajula, Principle Lecturer			
Client Organisation /Partners Insect Savo project			
<p>Abstract</p> <p>In this thesis, a pilot-scale mobile anaerobic dry digester was designed and constructed for Savonia University of Applied Sciences. The dry digester will be used for testing the methane production potential of various bio-masses. The feasibility of using the digestate as a food source for insects will also be tested. The thesis was carried out as part of the Insect Savo project. The aims of the project were to increase the know-how of the insect-based economy in North Savonia, create new demand for insects and insect products and develop the insect production chain to be more sustainable and profitable.</p> <p>To provide a basis for designing the pilot scale dry digester, literary material was gathered on the biogas process, biogas studies and built biogas plants. Requirements for the dry digester were composed by using the collected material. Based on these requirements, AutoCAD designs were made. One design was chosen based on the objectives set at the beginning of the dry digester design work.</p> <p>A report of necessary parts and their acquisition was made. Based on the report, the chosen dry digester design was modified and parts for the construction were acquired. The dry digester was constructed in the workshop of the environmental technology at Savonia University of Applied Sciences and relocated to the refrigerating room of the wastewater lab for testing. The functionality of the dry digester was tested. After the tests, trial runs were performed. The dry digester was then modified based on observations gathered from these runs.</p> <p>As a result of this thesis, a functional pilot-scale dry digester was constructed and user and safety manuals for the digester were compiled. The manuals include AutoCAD drawings and a flow chart of the digester.</p>			
Keywords			
dry digester, biogas, pilot-scale, anaerobic digestion			

## ESIPUHE

Kiitos Savonia-ammattikorkeakoululle erittäin kiinnostavasta opinnäytetyön aiheesta ja mahdollisuudesta suorittaa harjoittelu mielenkiintoisessa Insect Savo –hankkeessa. Haluan kiittää ohjaajiani Miika Kaheliniä ja Pasi Pajulaa. Lisäksi haluan kiittää Teija Rantalaa laitteistosuunnittelun ohjauksesta.

Haluan kiittää myös ympäristötekniikan henkilökuntaa monista neuvoista laitteiston suunnittelussa ja rakentamisessa. Erityisesti haluaisin kiittää Tero Kuhmosta ja Jari Sonnista heidän tarjoamastaan tuesta ja avusta laitteiston rakentamisessa.

Lopuksi haluan kiittää vielä laitteiston biokaasukokeissa kanssani työskennelleitä Jani Paukkosta ja Iida Pulkista.

Kuopiossa 29.4.2020

Juha Hämäläinen

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	8
2	YLEISTÄ BIOKAASUSTA .....	8
2.1	Biokaasuprosessi.....	8
2.2	Märkä- ja kuivamädätys .....	9
2.3	Biokaasuprosessiin vaikuttavat tekijät.....	9
2.4	Yksi- ja kaksivaiheinen reaktori .....	10
2.5	Jatkuva- ja panostoiminen reaktori.....	10
3	BIOKAASULAITOKSIA .....	10
3.1	Kymeenlaakson jäte Oy:n panostoiminen laitos.....	10
3.2	Bekon järjestelmä .....	11
3.3	Gicon järjestelmä .....	12
3.4	Bioferm järjestelmä .....	12
3.5	Bio-GTS bioboksi.....	13
3.6	Nivako järjestelmä .....	13
3.7	Earthlee järjestelmä .....	14
4	PILOT-LAITTEISTON VAATIMUKSET .....	15
4.1	Liikuteltavuus ja sähköntarve.....	15
4.2	Reaktorin olosuhteiden säätöjärjestelmät .....	15
4.3	biokaasun talteenotto, analysointi ja poisto .....	16
4.4	Mädätysjäännöksen testaus .....	16
4.5	Budjetti .....	16
5	SUUNNITELMAVAIHTOEHDOT .....	17
5.1	Prosessin valinta .....	17
5.2	Vaihtoehto 1 .....	17
5.3	Vaihtoehto 2.....	18
5.4	Vaihtoehto 3.....	19
6	RAKENNETTAVA LAITTEISTO .....	20
6.1	Versio 1.....	20
6.2	Versio 2.....	22
7	SIJOITTAMINEN .....	24
7.1	Sijoittamisen edellytykset .....	24

7.2	Sijoituspaikka .....	25
8	LAITTEISTON OSAT .....	25
9	LAITTEISTON RAKENTAMINEN .....	27
9.1	Runko .....	27
9.2	Reaktori .....	31
9.3	Perkolaattisäiliö.....	32
9.4	Kokoaminen .....	33
10	TESTAUS .....	34
11	KOEAJO1 .....	34
11.1	Toteutus .....	34
11.2	Muutokset .....	36
11.3	Tulokset .....	37
11.4	Johtopäätökset .....	38
12	KOEAJO 2 .....	38
12.1	Toteutus .....	38
12.2	Muutokset .....	38
12.3	Tulokset .....	38
12.4	Johtopäätökset .....	39
13	KOEAJO 3 .....	39
13.1	Toteutus .....	39
13.2	Muutokset .....	39
13.3	Tulokset .....	39
13.4	Johtopäätökset .....	40
14	VALMIIN LAITTEISTON TARKASTELU .....	40
14.1	Tavoitteiden toteutuminen.....	40
14.2	Kustannukset.....	41
14.3	Ongelmat .....	43
14.4	Laitteiston kehittäminen .....	43
15	KUIVAMÄDÄTYSLAITTEISTON OPTIMOINTI .....	44
15.1	Perkolaatin koostumus ja kierrätys.....	44
15.2	PH:n säätö .....	46
15.3	Lämpötila .....	47

15.4 Esikäsittely .....	47
16 KÄYTTÖOHJEET .....	48
16.1 Turvallisuus .....	48
16.2 Perkolaattisäiliön panostus .....	48
16.3 Reaktorin panostus .....	48
16.4 Kaasunkeräys .....	49
16.5 Perkolaatin kierrätys.....	49
16.6 Lämmönsäätö .....	50
16.7 Mittausaukon käyttö.....	50
16.8 Seuranta .....	50
16.9 Laitteiston huolto .....	51
17 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	52
LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT .....	53
LIITE 1: RAKENNETUN LAITTEISTON AUTOCAD-PIIRROS.....	55
LIITE 2: KUIVAMÄDÄTYSLAITTEISTON PROSESSIKAAVIO .....	56
LIITE 3: VIANMÄÄRITYSTAUUKKO .....	57
LIITE 4: TURVALLISUUSOHJEET .....	58
LIITE 5: VAARATILANTEEN TOIMENPITEET .....	59
LIITE 6: KUVIA LAITTEISTOSTA .....	60

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan Savonia-ammattikorkeakoululle testikäyttöön liikuteltava kuivamädätyslaitteisto, jolla voidaan tutkia erilaisten biomassojen kuivamädätyksen metaanintuottopotentiaalia. Laitteistosta saatavaa mädätysjännöstä toimitetaan hankkeessa Luken laboratorioon, jossa testataan sen soveltuvuutta hyönteisten ravinnoksi.

Opinnäytetyö toteutetaan osana Insect Savo –hanketta. Hanke alkoi 1.1.2019 ja päättyy 31.12.2020. Hankkeen päärahoittajat ovat Pohjois-Savon liitto ja EAKR. Hanketta tukevat myös Savonia Grasshopper ja StoraEnso. Hankeen toteuttajat ovat Savonia-ammattikorkeakoulu, Luonnonvarakeskus, Ylä-Savon koulutuskuntayhtymä ja Itä-Suomen yliopisto.

Hanke kokoaa yhteen Pohjois-Savon hyönteisalan yrittäjät sekä koulutus- ja tutkimusorganisaatiot luomaan hyönteisalan suuntaviivoja maakuntaan. Hankkeen tavoitteena on lisätä hyönteisalan osaaamista Pohjois-Savossa, luoda uutta kysyntää hyönteisille ja niistä jalostetuille tuotteille sekä kehittää hyönteistuotantoketjua kestävään ja kannattavaan suuntaan. Hankkeessa verkotetaan hyönteisalan toimijoita, ideoidaan uusia liiketoimintamalleja ja luodaan markkinoita hyönteistuotteille sekä kokeillaan uusien lajien kasvatusta lemmikkieläinsektorin tarpeisiin. Tämän lisäksi hankkeessa selvitetään hyönteistuotteiden ravintosisältöjä ja mikrobiologista laatua sekä järjestetään infotilaisuuksia ja työpajoja hyönteistalouteen liittyen. Hankkeessa selvitetään hyönteisten käyttömahdollisuuksia biojätteidensä sekä elintarviketuotannon, maatalouden ja metsäteollisuuden sivuvirtojen käsittelyssä.

## 2 YLEISTÄ BIOKAASUSTA

### 2.1 Biokaasuprosessi

Biokaasu on kaasuseos, joka koostuu pääosin metaanista (CH<sub>4</sub>) ja hiilidioksidista (CO<sub>2</sub>). Metaania biokaasussa on keskimäärin kaksi kolmasosaa ja hiilidioksidia yksi kolmasosaa. (Motiva, 2013, 3.) Biokaasun koostumus on esitetty taulukossa 1.

Aine	%
Metaani, CH <sub>4</sub>	55-75
Hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	25-45
Hiilimonoksidi, CO	0-0,3
Typpi, N <sub>2</sub>	1-5
Vety, H <sub>2</sub>	0-3
Rikkivety H <sub>2</sub> S	0,1-0,5

Taulukko 1. Biokaasun keskimääräinen koostumus. (Motiva, 2013, 3.)



Biokaasua voidaan tuottaa hajottamalla orgaanista ainetta anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa. Hajottajina tässä biologisessa prosessissa toimivat anaerobiset mikrobit, jotka pilkkovat suuret orgaaniset molekyylit liukoisempaan muotoon. Näitä orgaanisia yhdisteitä ovat proteiinit, hiilihydraatit ja lipidit. Mädätysprosessi tapahtuu vaiheittain ja eri mikrobikantojen avulla. Ensimmäisessä vaiheessa eli hydrolyysissä proteiinit, hiilihydraatit ja rasvahapot pilkkoutuvat mikrobien toimesta aminohapoiksi, sokereiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi. Toisessa vaiheessa eli happokäymisessä mikrobit käyttävät edellisen vaiheen lopputuotteita propionaateiksi ja butyraattiksi. Kolmannessa vaiheessa eli asetogeneesissä näistä hapoista tuotetaan etikkahappoa ja vetyä. Viimeisessä vaiheessa eli metanogeneesissä metaania tuottavat mikrobit tuottavat etikkahaposta ja vedystä metaania. Prosessissa syntyy biokaasua, joka sisältää pääosin metaania ja hiilidioksidia. Prosessista jää jäljelle mädätysjäännös. (Latvala, 2009, 29.)

## 2.2 Märkä- ja kuivamädätys

Mädätys voidaan jakaa märkä- ja kuivamädätykseen syötteen kuiva-ainepitoisuuden (TS) mukaan. Märkämädätyksessä syöte on lietemäistä ja sen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 5-15 % kun taas kuivamädätyksessä syöte on kasassa pysyvää ja kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 20-50 %. Korkean kuiva-ainepitoisuuden ansiosta kaasuntuotantoon tarvittava reaktoritilavuus ja mädätysjäännöksen määrä on märkäprosessia korkeampi. (Latvala, 2009, 29-32).

## 2.3 Biokaasuprosessiin vaikuttavat tekijät

Lämpötila on merkittävä biokaasuntuotantoon vaikuttava tekijä. Mädätysprosessi voidaan jakaa lämpötilaolosuhteiden mukaan mesofiiliseen ja termofiiliseen prosessiin. Mesofiilinen mädätyksessä lämpötila on tyypillisesti välillä 35-43°C ja termofiilisessä mädätyksessä 50-55°C. Optimilämpötila-aluetta tärkeämpi on lämpötilan tasaisuus. Lämpötilavaihtelun tulisi pysyä mahdollisimman pienenä, mieluiten +/-2°C. Mesofiilinen prosessi ei ole herkkä lämpötilan vaihteluille ja sen lisäenergiantarve on 10-30% pienempi kuin termofiilisen prosessin. Termofiilinen prosessi on herkempi pH:n ja lämpötilanvaihteluille sekä kestää heikommin inhiboivia tekijöitä. (Kymäläinen, 2015, 63-65.)

Prosessin tehokkuus riippuu sen happamuudesta (pH). Tyypillisesti biokaasureaktorin pH on välillä 7-8. Eri mikrobeilla on kuitenkin erilaiset pH-optimalueet. Anaerobisen hajoamisen alkuvaiheen mikrobien pH-optimalue on välillä 4,5-6,5 kun taas metanogeenit vaativat korkeamman pH:n. Tyypillisesti yli 6,7 muttei yli 8,5. Hyvin toimivassa prosessissa pH pysyy vakiotasolla. Tähän vaikuttaa merkittävästi biokaasutettavan materiaalin puskurointikyky eli kyky neutraloida muodostuvia happoja. Puskurointikykyyn vaikuttaa eniten bikarbonaatti-karbonaattipuskurisysteemi. Hyvällä puskurointikyvyllä eli hyvällä alkaaliteetillä estetään pH-vaihtelua. (Kymäläinen, 2015, 63-65.)

## 2.4 Yksi- ja kaksivaiheinen reaktori

Kuivamädätysreaktorit ovat yleisesti yksivaiheisia, mikä tarkoittaa, että laitteisto koostuu yhdestä reaktorista, jossa raaka-aineiden hajoaminen ja biokaasun muodostus tapahtuu. Kaksivaiheisessa reaktorissa hydrolyysi ja metanogeneesi tapahtuvat eri reaktoreissa. Tämä tarkoittaa kahta sarjassa toimivaa reaktoria, joita kontrolloidaan toisistaan poikkeavasti. Tavoitteena kaksivaiheisessa reaktorissa on optimoida hajoamisen eri vaiheet siten, että hydrolyysi ja asidogeneesi tapahtuu erillisessä reaktorissa niille optimaalisissa olosuhteissa ja metanogeneesi omassa reaktorissa sille optimaalisissa olosuhteissa. (Kymäläinen, 2015, 88-89).

Tällainen laitteisto on esimerkiksi suotopeti (leach-bed), jossa syötettä huuhdellaan nesteellä (perkolaattilla), johon hajoamistuotteet liukenevat. Neste johdetaan erilliseen biokaasureaktoriin, joka voi olla anaerobinen lietepatjareaktori (UASB), sisäisen kierron reaktori (IC) tai anaerobinen suodatin.

## 2.5 Jatkuva- ja panostoiminen reaktori

Jatkuvatoimisissa prosessissa mädätettävää materiaalia syötetään säännöllisesti reaktoriin ja mädätysjäännöstä poistetaan säännöllisesti reaktorista. Jatkuvatoiminen prosessi perustuu yleensä tulppavirtausmenetelmään. Syöttö sylinterimäiseen, vaakatasossa makaavaan reaktoriin tapahtuu reaktorin päädyssä ruuvipuristimella. Käsiteltävää massaa siirretään reaktorin sisällä sekoittimilla ja mädätysjäännös puretaan ulos toisesta päästä. Biokaasua muodostuu jatkuvatoimisessa prosessissa tasaisesti. Syöttöön on lisättävä merkittävästi jo kertaalleen prosessin läpikäynyttä mädätysjäännöstä tai reaktorissa on kierrätettävä prosessissa suotautuvaa vettä tai jäännöksestä erotettua nestettä. Prosessin nesteiden kierrättämistä on optimoitava, jottei prosessin typpipitoisuus nouse inhiboivalle tasolle. (Kymäläinen, 2015).

Panostoimisessa reaktorissa mädätettävä materiaali syötetään reaktoriin. Reaktori suljetaan, materiaalin annetaan hajota haluttu aika ja lopuksi reaktori tyhjennetään. Panokseen yleisesti sekoitetaan prosessin aiempaa mädätysjäännöstä ympiksi. Reaktorissa voidaan myös kierrättää panoksen läpi suodattuvaa nestettä eli perkolaattia suihkuttamalla sitä panoksen päälle. Tällöin voidaan kierrättää mikrobeja, säädellä panoksen kosteutta sekä säädellä hajoamisprosessia ja biokaasuntuotantoa. Biokaasua muodostuu panosreaktorissa vähitellen lisääntyen ja muuttuen hiilidioksidi-pitoisemmasta kaasusta metaani-pitoisemmaksi, ja loppua kohden määrällisesti vähentyen. Kaasuntuotantoa voidaan tasata asentamalla rinnakkaisia panosreaktoreita ja ajastamalla ne niin, että kaasuntuotto on jatkuvaa. (Kymäläinen, 2015, 86-88.)

# 3 BIOKAASULAITOKSIA

## 3.1 Kymeenlaakson jäte Oy:n panostoiminen laitos

Laitos koostuu kahdesta suotopetireaktorista, perkolaattisäiliöstä ja nestemäisen jätteen säiliöstä, johon vastaanotetaan rasvapitoiset jätteet. Raaka-aineet käsitellään kahdella panostoimisella kuiva-

mädätysreaktorilla. Reaktorit ladataan pyöräkuormaajalla. Täysi reaktori suljetaan kaasutiiviillä katteella. Prosessi käynnistetään pumppaamalla lämmintä mikrobipitoista prosessinestettä (perkolaattia) biomassaan. Massan läpi suotuessaan perkolaatti lämmittää biomassan prosessilämpötilaan, ympäristöä sen mikrobeilla ja liuottaa orgaanista ainetta hajotettavaksi perkolaattisäiliössä. Uuden panoksen täyttö aloitetaan vanhan purkamisen jälkeen. Panosreaktoreita käytetään vuorotellen, jolloin toisen ollessa täytettävänä, toinen on tyypillisesti käsittelyajan puolivälissä. (AVI 2016, 6-8.)

Jatkuvatoiminen, täyssekoitteinen (CSTR) perkolaattisäiliö ja panosreaktorit ovat betonirakenteisia ja kaasu- ja nestetiiviitä. Lämmitys tapahtuu ulkoisilla lämmönvaihdinputkilla. Prosessilämpötilana voidaan käyttää mesofiilistä aluetta 35–42,9 °C tai termofiilistä 50–55,9 °C. Lämpötilaa tarkkaillaan panosreaktoreista jatkuvatoimisesti kolmesta pisteestä ja perkolaattisäiliötä yhdestä pisteestä. Reaktorit on varustettu yli- ja alipaineventtiilein. (AVI 2016, 6-8.)

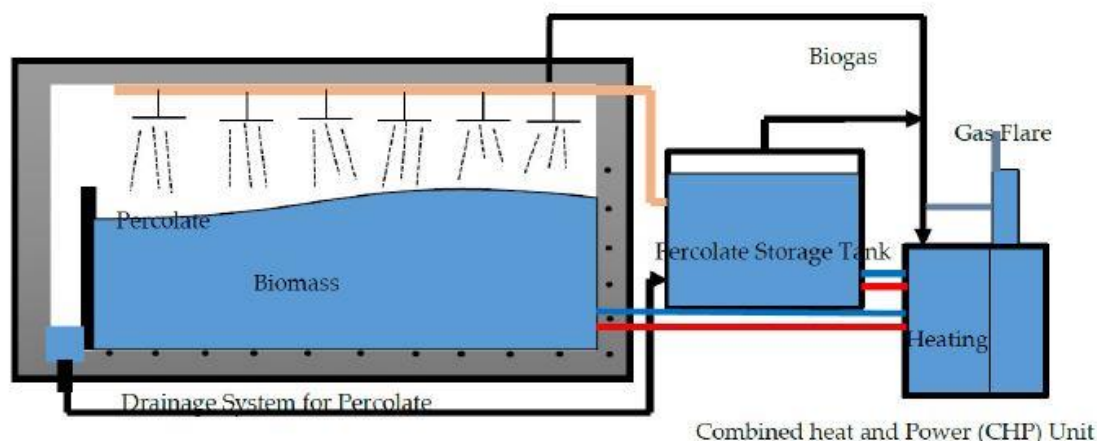
Tyypillinen viipymä panosreaktorissa on kolme kuukautta, jonka aikana orgaaninen aines hajoaa ja stabiloituu ja sen hygieeninen laatu paranee. Mädätyksen jälkeen käsitelty massa siirretään käsittelykentälle ja jatkokäsittellään jälkikompostoimalla, sekoittamalla ja tarvittaessa seulomalla lannoitevalmisteen, kompostimullaksi tai loppusijoitettavaksi tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Varastointi tapahtuu kentillä, joilla on nestetiivis pohja ja toimiva hulevesien keräily.

Nestemäistä käsittelyjäännöstä syntyy prosessissa hyvin vähän tai ei ollenkaan. Rasvankaivojätteen käsittelyssä käsitellään laskeutuneen kiintoaineen lisäksi myös nestejäte. (AVI 2016, 6-8.)

Raaka-aineet ja mädätysjäännös varastoidaan varastointikentälle. Biokaasureaktoreista biokaasu kerätään perkolaattisäiliöön, josta se johdetaan kaasulinjaa pitkin käyttötarkoituksen mukaan esimerkiksi yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa varten CHP-yksikölle, biokaasulaitoksen lämpökattilalle tai häiriötilanteissa soihdulle, jossa kaasu poltetaan metaanipäästöjen estämiseksi. Tuotettu ylijäämä sähkö voidaan myydä verkkoon. Vaihtoehtoisesti biokaasusta voidaan jalostaa liikennepolttoainetta erillisellä jalostusyksiköllä. Panoksen vaihdon yhteydessä vapautuvaa metaani- ja hajupäästöjä minimoidaan hapettamalla massaa biologisesti syöttämällä siihen ilmaa ennen panoksen avaamista. (AVI 2016, 6-8.)

### 3.2 Bekon järjestelmä

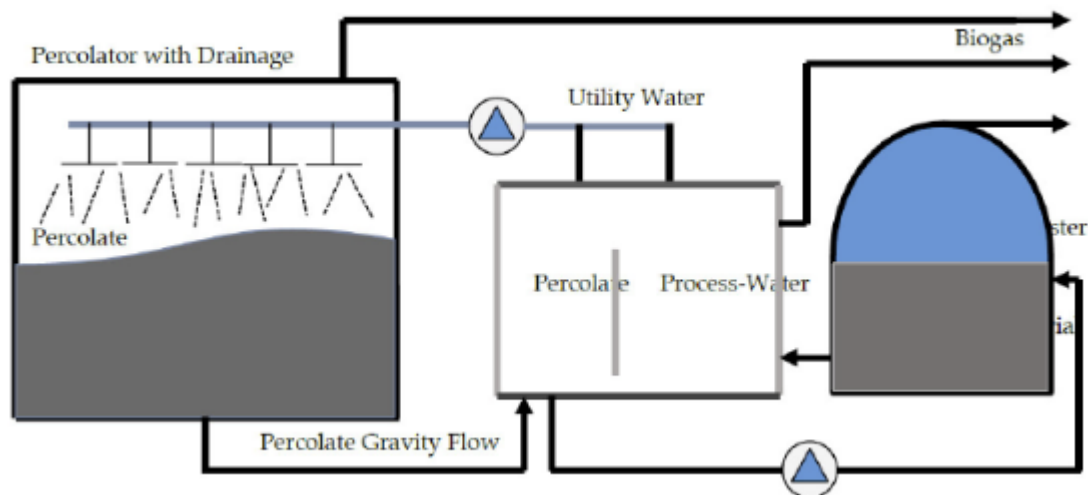
Bekon-prosessi on yksivaiheinen ja panostyyppinen ”autotali” –malli (kuva 1). Sitä käytetään lähinnä maatalouden kasvibiomassojen biokaasutukseen. Mädätyksessä syntyvä perkolaationeste kerätään vedenpoistoverkoston kautta perkolaattisäiliöön, mistä sitä kierrätetään takaisin prosessiin. Lattia- ja seinälämmityksellä pidetään lämpötila mikrobien kannalta optimisella tasolla. Perkolaationesteen syötön optimointi on tärkeää biokaasun saannin lisäämiseksi järjestelmässä. (FU, 2018, 4.)



Kuva 1. Luonnos Bekon järjestelmästä. (FU, 2018, 4.)

### 3.3 Gicon järjestelmä

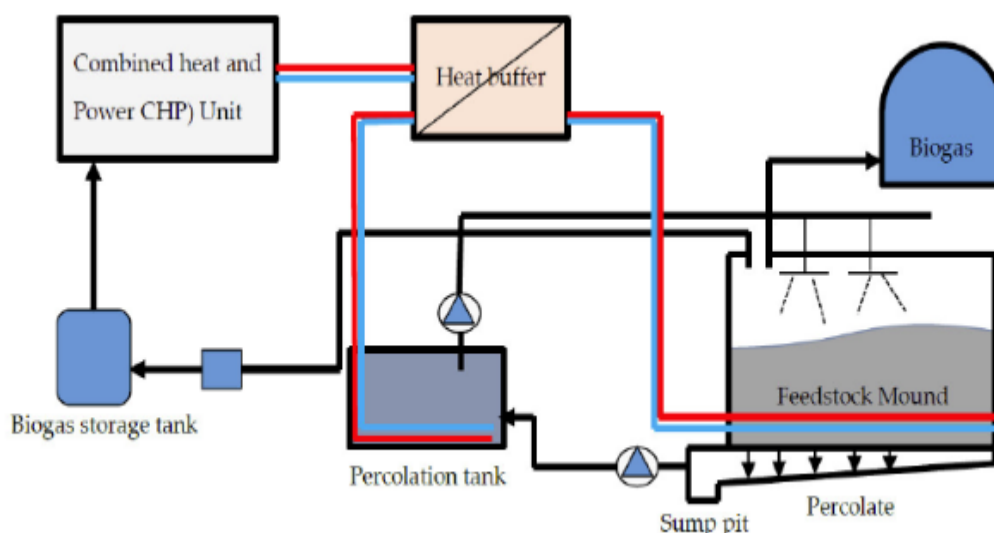
Gicon järjestelmä on kaksivaiheinen panoskuivamädättämö (kuva 2), joka toimii ilman ympäriä. Järjestelmä perustuu perkolaationesteen kierrätykseen. Järjestelmä jakaa biokaasuprosessin asetogeneesiin ja metanogeneesiin. Menetelmällä varmistetaan tasaisen toimivuus ja parempi suorituskky. Menetelmä vähentää riskiä prosessin happamoitumiselle. (FU, 2018, 4.)



Kuva 2. Luonnos Gicon järjestelmästä. (FU, 2018, 5.)

### 3.4 Bioferm järjestelmä

BioFerm järjestelmä on yksivaiheinen panoskuivamädättämö (kuva 3). Sen kuiva-ainepitoisuus voi olla 25 % -35 %. Perkolaatin kierrätysjärjestelmä on suunniteltu siten, että se kerää CHP:n (yhdistetty lämmön- ja sähköntuotto yksikkö) jäännöslämpöä. Järjestelmän etuja ovat vähäinen biokaasutettavan massan esikäsittelyn tarve, johtuen suuripartikkelisesta rehusta sekä tehokkaasta lämmityksestä johtuva alhaisempi energiankulutus. (FU, 2018, 5.)



Kuva 3. Luonnos Bioferm järjestelmästä. (FU, 2018, 5.)

### 3.5 Bio-GTS bioboksi

Suomalaisen BioGTS:n kehittämä bioboksi (kuva 4) on täysin automatisoitu ja jatkuvatoiminen reaktori, jossa prosessi toimii tuubiperiaatteella. Se on skaalattavissa ja siirrettävissä. Bioboksi koostuu konttirakenteisesta biokaasureaktorista, biokaasun jalostusyksiköstä sekä biometaanin tankkauspisteestä. Raaka-aineina käytetään yhdyskuntien biojätettä, jätevesilietettä, eläinten lantaa sekä kasvibiomassaa kuten maatalousjätettä ja energiakasveja. Syötteitä voidaan käsitellä jopa 40 % kuiva-ainepitoisuudessa. (BIO-GTS, 2018, 10-16.)

Raaka-ainetta syötettäessä biomassa liikkuu jatkuvasti eteenpäin. Sekoitusta tapahtuu reaktorin sisällä olevalla ruuvilla (Huikuri, 2014-10-24).



Kuva 4. Luonnos Bio-GTS:n bioboksista. (BIO-GTS, 2018, 11.)

### 3.6 Nivako järjestelmä

Nivako Oy:n edustama teknologia perustuu panoskontteihin, joita täytetään ja puretaan vuoron perään. Kaasuntuotanto pysyy koko ajan vakiona eri prosessivaiheissa olevien panoskonttien ansiosta. Panoskontit toimivat automaattisesti. Kontit tarvitsevat kuitenkin täytön ja tyhjennyksen

noin 3 viikon välein käytetyn syötteen mukaan. Tuoretta heinää syötettäessä, viipymä voi olla jopa 6 viikkoa. Panostamalla kolme konttia viikon välein, täyttöjä ja tyhjennyksiä tulee tällöin tehdä kerran viikossa. Lataukseen ja täyttöön tarvitaan etukuormaaja. Yhden kontin purkamis- ja latausaika on yleisesti 2-3 tuntia viikossa. Muuta työtä biokaasulaitos ei käytännössä tarvitse. Konteissa ei ole ollenkaan liikkuvia osia. Prosessissa syntyvän nesteen kierrätyksellä levitetään reaktoriin oikea mikrobikanta ja tarjotaan mikrobeille tarpeeksi nestettä biokaasun muodostusprosessia varten. (Huikuri, 2014-10-24.)

### 3.7 Earthlee järjestelmä

Earthlee järjestelmän ydin on yksivaiheinen ja panostoiminen reaktori (kuva 5). Mahdollisia syötteitä ovat olki, ligniiniä sisältävä rehu, hevosenlanta, ruoho ja puutarhajäte. Järjestelmän etuja ovat jatkuva kaasuntuotanto, jatkuva mädätysjäännöksen kierto, helppokäyttöisyys ja nopea asennus. (EARTHLEE, 2018).

Reaktorina toimii muovisista suojapeitteistä rakentuva reaktori. Reaktori on helppo täyttää ja purkaa etukuormaajalla.



Kuva 5. Earthlee järjestelmän biokaasureaktori. (EARTHLEE, 2018.)

## 4 PILOT-LAITTEISTON VAATIMUKSET

Tässä luvussa käsitellään vaatimuksia, joita laitteistolla oli suunnittelun alkaessa. Tässä luvussa käsitellään myös vaatimuksia, joita kuivamädätyslaitteistoille yleensä asetetaan.

### 4.1 Liikuteltavuus ja sähköntarve

Pilot-kuivamädätyslaitteistoa tullaan operoimaan Savonia-ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan laboratoriossa Kuopiossa. Laitteisto on kuitenkin tarkoitus rakentaa sellaiseksi, että sitä voidaan tarvittaessa liikutella paikasta toiseen. Liikuteltavuuden toteuttamiseksi on kolme vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa laitteisto on painoltaan ja mittasuhteiltaan sellainen, että se voidaan siirtää helposti esimerkiksi perävaunulla. Toisessa vaihtoehdossa laitteisto voidaan purkaa pienempiin osiin liikuteltavuuden parantamiseksi. Kolmantena vaihtoehtona on laitteiston sijoittaminen helposti kuljetettavan rakenteen sisälle esimerkiksi merikonttiin. Laitteiston liikuteltavuus edellyttää, että sitä ei ole kiinnitettyä laitteisiin tai järjestelmiin, joita ei voida siirtää laitteiston mukana.

Biokaasureaktorin lämpötilan saaminen mesofiiliselle tai termofiiliselle alueelle vaatii energiaa. Tämä voidaan toteuttaa lämmittämällä reaktoria suoraan erityyppisillä sähkövastuksilla tai lämmittämällä sähkövastuksella väliainetta kuten vettä, ja kierrättämällä sitä reaktorissa. Laitteiston liittyminen sähköverkkoon pitää toteuttaa siten, että se ei haittaa laitteiston liikuteltavuutta.

Sähköverkkoon on saatava liitettyä pilot-laitteiston mitta- ja hallintalaitteet.

### 4.2 Reaktorin olosuhteiden säätöjärjestelmät

Reaktorin olosuhteita tulee voida säätää, jotta prosessi voidaan pitää optimaalisella tasolla. Olosuhteita voidaan säätää manuaalisesti tai automaattisesti. Manuaalisessa säädössä anturit antavat tietoa olosuhteista. Tiedon perusteella operaattori voi tehdä tarvittavia muutoksia. Automaattisessa säädössä anturien mittaustieto välittyy säätöjärjestelmälle, joka saadun tiedon perusteella tekee muutokset valmiiksi asetettujen tavoitearvojen mukaisesti.

Laitteistoon voidaan asentaa antureita antamaan tietoa reaktorin lämpötilasta, pH:sta, kosteudesta, biokaasutettavan massan painosta tai alkaaliteetistä. Perkolaattisäiliöstä voidaan saada tietoa perkolaatin lämpötilasta, pH:sta, alkaaliteetistä tai perkolaatin syötön nopeudesta. Lämpötilan säätö voidaan toteuttaa ohjatusti lämpötilanohjausyksikön kautta tai suoraan termostaatilla. pH:n säätö voidaan toteuttaa ohjatulla säätölaitteella, joka lisää prosessiin happoa tai emästä pH:n muuttamiseksi. Säätöaineita ovat esimerkiksi etikkahappo ja natriumhydroksidi. Säätö voidaan tehdä myös käsin säätöaineita lisäämällä.

Jatkuvatoimisessa reaktorissa biokaasutettava materiaali on syötettävä ruuvipuristimella tai vastaavalla laitteella reaktoriin ja moottoroiduilla sekoittajilla kuljetettava eteenpäin reaktorissa. Syöttönopeutta ja sekoituksen nopeutta voidaan säätää automaattisesti tai manuaalisesti prosessista saadun

tiedon perusteella. Panosreaktorissa massaa voidaan myös sekoittaa moottoroidun sekoittajan avulla. Jatkuvatoiminen reaktori vaatii syötteen esikäsittelyä kuten tutkittavan materiaalin pilkkomista pienemmäksi.

#### 4.3 biokaasun talteenotto, analysointi ja poisto

Biokaasu on kaasuseos, joka sisältää pääosin metaania ja hiilidioksidia. Metaani ja hiilidioksidi ovat suurina pitoisuuksina hengitettynä hengenvaarallisia. Tästä syystä kaasun talteenotto on suunniteltava siten, että kaasun säilytys, käsitleminen ja laitteiston läheisyydessä työskentely on turvallista. Kaasunkäsittelyyn on suunniteltava ohjeistus.

Laitteistossa muodostuva kaasu on otettava talteen kaasutiiviisiin pusseihin tai säiliöihin, joista se voidaan analysoida. Biokaasun analysointia varten kaasu on johdettava kaasuanalysaattoriin. Analyysi voidaan vaihtoehtoisesti tehdä tietyin väliajoin näyteluontoisesti. Kaasun määrän mittausta varten on kolme vaihtoehtoa. Kaasun määrä mitataan kaasunvirtausmittarilla, Savonian kaasuntilavuusmittauslaitteistolla tai kaasu johdetaan astiaan, jonka tilavuus voidaan laskennallisesti määrittää. Biokaasu pitää voida poistaa laitteistosta ja laitteistotilasta turvallisesti. Kaasupussit on voitava tyhjentää turvallisesti.

#### 4.4 Mädätysjäännöksen testaus

Pilot-kuivamädättämön mädätysjäännöstä tullaan Insect Savo –hankkeessa testaamaan mustasotilaskärpästen toukilla. Laitteistolla on tarkoitus mädättää eri biomassoja ja testata niiden soveltuvuutta hyönteisten ravinnoksi. Laitteisto pitää suunnitella siten, että se soveltuu erilaisten biomassojen mädätykselle. Laitteistosta on saatava otettua mädätysjäännöstä hyönteiskokeisiin.

#### 4.5 Budjetti

Pilot-kuivamädätyslaitteiston rakentamisen budjetti on tiukka ja rajaa suunnitteluvaihtoehtoja. Laitteiston rakentamisessa joudutaan käyttämään kierrätettyjä osia. Laitteiston reaktori tulee sijoittaa jo osittain olemassa olevaan eristettyyn runkoon. Tällaisia runkoja voivat olla jääkaappi, pakastin, uuni tai tilavuudeltaan suuri keitin. Reaktorin lämpötilan säätö ja pH:n mittausta on mahdollista toteuttaa käytetyillä tai ostettavilla laitteilla. Kuitenkin pH:n automaattinen säätö ei ole mahdollinen budjetin puitteissa, kuten ei myöskään kaasuanalysaattorin ostaminen. Kaasunvirtausmittari on mahdollista sisällyttää suunnitelmaan. Laitteisto saattaa tarvita sekoittajan, mikä on hankittavissa budjetin puitteissa niin kuin myös perkolaatin kierrätykseen tarvittava pumppu.



## 5 SUUNNITELMAVAIHTOEHDOT

### 5.1 Prosessin valinta

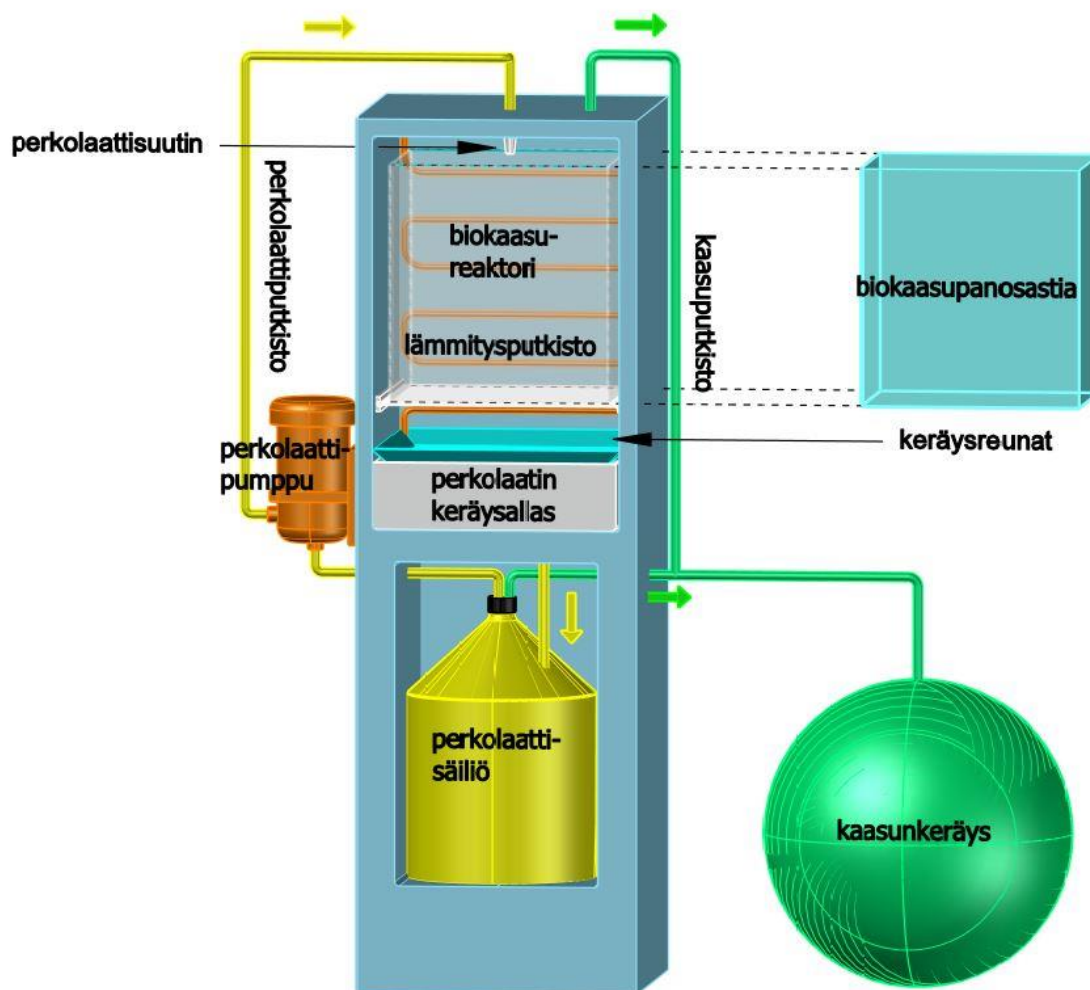
Kerätyn aineiston perusteella ja laitteistovaatimukset huomioon ottaen valittiin kuivamädätyslaitteiston suunnittelun pohjaksi mesofiilinen, ”autotallimallin” kuivamädätykseen perustuva panosprosessi. Panosprosessin etuina ovat alhaisemmat rakennuskustannukset verrattuna jatkuvatoimiseen prosessiin sekä pienempi prosessin monitoroinnin tarve. Sekoitettavissa reaktoreissa joskus tapahtuu syötemateriaalin aiheuttamaa sekoittimien jumittumista. Tätä ongelmaa ei ole sekoittamattomassa reaktorissa. Panostoimisessa laitteistossa ei ole tarvetta jatkuvalla prosessiautomaatiikalle, mikä selvästi laskee rakentamiskustannuksia. Panostoiminen prosessi soveltuu myös paremmin erilaisten biomassojen kaasutukseen. Jokaisesta testattavasta biomassasta voidaan tehdä erillinen panos, jonka mädätysjäännöksestä voidaan ottaa näyte hyönteiskokeisiin. Jatkuvatoimisen prosessin hankaluutena on prosessin pitäminen vakaana syötteen vaihtuessa. Mesofiilinen prosessi on termofiilistä prosessia vakaampi.

Panosprosessi ei ole yhtä herkkä sähkökatkoksille kuin jatkuvatoiminen prosessi. Jatkuvatoimisessa reaktorissa sähkökatko voi aiheuttaa ylivuodon sekoittajien pysähtyessä. Panoskuivamädätyslaitteistoa ei myöskään ole tarvetta ajaa alas toisin kuin jatkuvatoimista laitteistoa. Panosprosessissa biomassoja ei tarvitse pilkkoa yhtä suuressa määrin. Mädätysjäännös on myös panosprosessissa yleensä heikommin hajonnutta, mikä voi edesauttaa sen toimivuutta hyönteisten ravintona. Pilot-kuivamädätyslaitteistosta suunniteltiin kolme vaihtoehtoa. Kaksi suunnitelmaa pohjautui hankkeen budjettiin. Kolmas suunnitelma perustui rajoittamattomaan budjettiin ja sen tarkoitus oli havainnollistaa suurempaa pilot-luokan laitteistoa, jota voidaan suoraan soveltaa esimerkiksi maatilojen biokaasun tuotantoon.

### 5.2 Vaihtoehto 1

Laitteisto rakennetaan käytöstä poistettuun jääkaappipakastimeen. Jääkaappi muutetaan biokaasureaktoriksi ja pakastin perkolaattisäiliön säilytystilaksi. Laitteistoa lämmitetään jääkaappipakastimen sisäseinään asennettavalla lämmitysjärjestelmällä. Lämmitysjärjestelmää ohjataan lämmönohjausyksiköllä.

Reaktoriin asetetaan biokaasupanos, jota lämmitetään mesofiilistä biokaasuprosessia suosivaan lämpötilaan. Panosta kastellaan säännöllisesti perkolaattineesteellä, jota pumpataan pakastimen säiliöstä biokaasutettavan massan päälle. Massan läpi suotautuva perkolaattineeste kerätään takaisin perkolaattisäiliöön uudelleenkierrätettäväksi. Prosessissa syntyvä kaasu kerätään reaktorista ja perkolaattisäiliöstä kaasupussiin. Laitteisto havainnollistettu kuvassa 6.

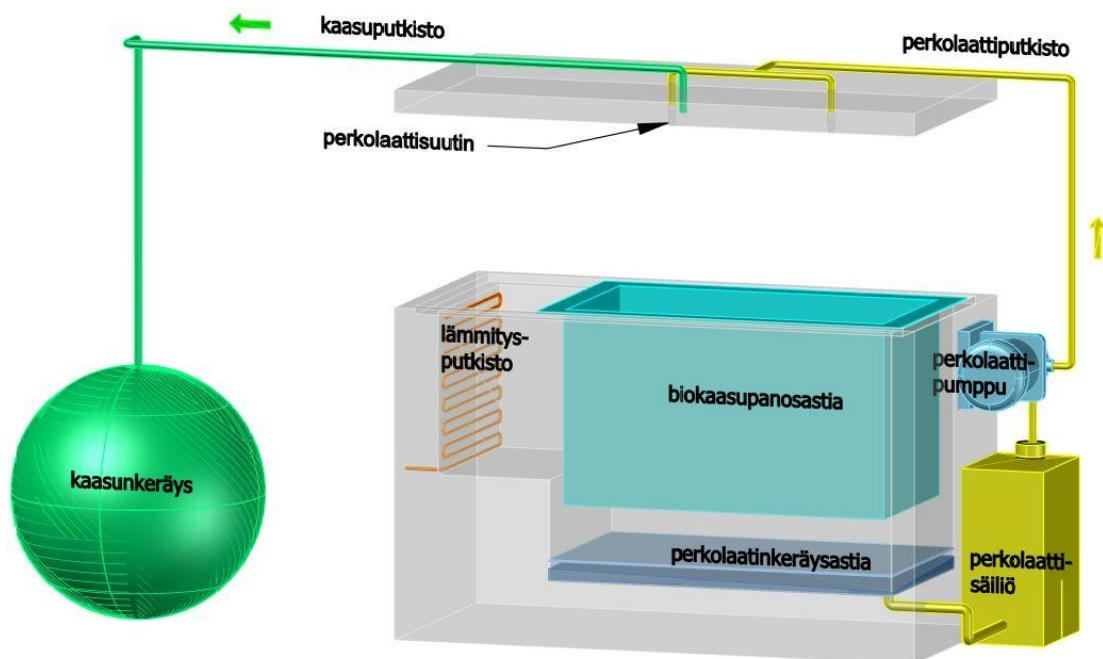


Kuva 6. AutoCAD-piirros ensimmäisestä suunnitelmavaihtoehdosta. (Hämäläinen, 2020.)

### 5.3 Vaihtoehto 2

Laitteisto rakennetaan käytöstä poistettuun arkkupakastimeen. Pakastintila muutetaan biokaasureaktoriksi. Reaktoria lämmitetään pakastimen sisäseinään asennettavalla lämmitysjärjestelmällä, jota ohjataan lämmönohjausyksiköllä kuten vaihtoehdossa 1.

Biokaasupanos asetetaan pakastuskorien paikalle rakennettavaan koriin. Panosta lämmitetään mesofiiliseen lämpötilaan. Panosta kastellaan säännöllisesti pumppaamalla laitteiston kylkeen asennetusta perkolaattisäiliöstä perkolaattinestettä biokaasutettavan massan päälle. Massan läpi suotautuva perkolaattineste kerätään takaisin säiliöön pakastimen pohjaan tehtävän kallistuksen ja poistoputken kautta. Prosessissa syntyvä kaasu kerätään reaktorista ja perkolaattisäiliöstä kaasupussiin. Laitteisto havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 7. AutoCAD-piirros toisesta suunnitelmavaihtoehdosta. (Hämäläinen, 2020.)

#### 5.4 Vaihtoehto 3

Laitteisto rakennetaan merikonttiin. Merikonttiin rakennetaan kaksi erillistä ja erisuuruista tilaa. Tiloihin käynti tapahtuu kontin päädyistä. Suurempaan tilaan rakennetaan biokaasureaktori ja pienempään valvontatila. Reaktori eristetään ja vuorataan biokaasuprosessin olosuhteita sietävällä materiaalilla. Reaktorin pohjaan rakennetaan kaltevat urat perkolaattinesteen poistolle ja pumppukuoppa, johon perkolaattineste valuu. Reaktorin pohjaan rakennetaan myös sähkötoiminen tai vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä. Reaktorin kattoon asennetaan kaksi perkolaatin suihkutuspukistolinjaa.

Valvontatila eristetään ja vuorataan vanerilla. Tilaan asennetaan perkolaattisäiliö, joka yhdistetään suihkutuspukistoon sekä perkolaattikuopan pumppuun. Mahdollinen vesikiertoinen lämmityspukisto liitetään valvontatilaan asennettavaan pumppuun ja lämminvesivaraajaan.

Kaasunmittausta varten asennetaan kaasunkeräysputkisto kontin katon kautta valvontatilaan asennettaville kaasumanometrille ja kaasuanalysointilaitteille. Poistopukisto rakennetaan kaasunmittausinstrumenteilta kontin katolle. Valvontatilaan asennetaan ohjauslaitteisto lämmityksen ja perkolaatinkierrätyksen säädölle sekä mittausinstrumenteilla.

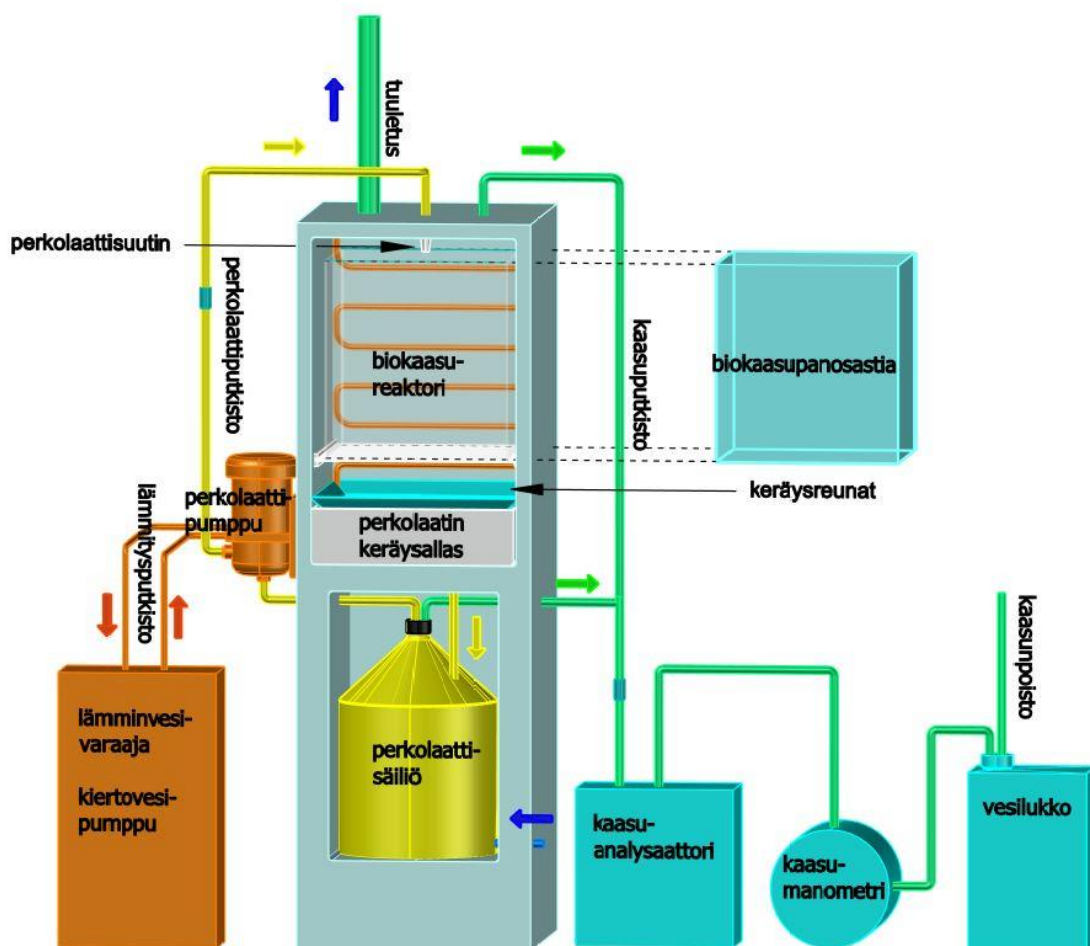
Vaihtoehtoisesti järjestelmä voidaan jakaa kahteen erilliseen konttiin. Toiseen konttiin rakennetaan kuivämädätysreaktori ja toiseen tilat perkolaattisäiliölle, lämminvesivaraajalle, kaasunmittauslaitteistolle, mittausdatan tallennuksella sekä perkolaatti- ja kiertovesipumpulle. Reaktorikontti rakennetaan helposti liikuteltavaksi ja käytettäväksi. Kontin kansi rakennetaan avattavaksi. Avoimen yläosan kautta voidaan reaktori helposti täyttää esimerkiksi etukuormaajalla. Kontin pohja rakennetaan siten, että se voidaan siirtää traktorin lavalle. Lavalla kontti voidaan siirtää tyhjennettäväksi. Reaktori

tyhjennetään kallistamalla konttia traktorin lavalla ja valuttamalla mädätysjännös ulos kontin päätyovien kautta. Kontti voidaan toimenpiteen jälkeen panostaa uudelleen.

Biokaasutusvaiheessa perkolaatinkierto, lämmitys, kaasunkeräys ja säätölaitteet konttien välillä yhdistetään irrotettavilla letkuilla ja johdoilla. Kaasunkeräystä varten rakennetaan erillinen kaasukello kaasutiiviistä materiaalista. Reaktorin kaasunkeräys yhdistetään toisen kontin mittausinstrumenteille ja instrumenteilta edelleen kaasukellolle. Laitteistoa kehitettäessä voidaan järjestelmään liittää chp-yksikön kontti, joka tuottaa sähköä ja lämpöä biokaasusta. Reaktorikontteja voidaan myös rakentaa useita ja panostaa ne viiveellä toisiinsa nähden. Tällöin panoskokeita voidaan tehdä useampia saman aikaisesti ja biokaasuntuotto saadaan tasaiseksi chp-yksikköä varten.

## 6 RAKENNETTAVA LAITTEISTO

### 6.1 Versio 1



Kuva 8. AutoCAD-piirustus versiosta 1. (Hämäläinen, 2020.)

Esitetyistä kolmesta vaihtoehdosta päädyttiin suunnittelua jatkamaan ensimmäisen vaihtoehdon pohjalta. Vaihtoehto 3 oli lähimpänä ”autotallimallin” kuivamädätyslaitteistoa, jollaista voidaan suoraan soveltaa esimerkiksi maatalouden biokaasuntuotannossa. Erilaisia versioita tällaisista kuivamädätyslaitteistoista on käytössä Suomessa ja maailmalla. Insect Savo –hankkeen budjetti kuitenkin rajoitti sen toteutettavien vaihtoehtojen ulkopuolelle. Toinen vaihtoehto hylättiin, koska laitteiston puhdistamisen todettiin olevan hankalaa. Ensimmäisen vaihtoehdon pohjalta tehtiin suunnitelma versioksi 1. Versio 1 havainnollistettu kuvassa 8.

Laitteisto rakennetaan käytöstä poistettuun jääkaappipakastimeen. Jääkaappi muutetaan biokaasu-reaktoriksi. Reaktorin pohjalle vihanneslokeroiden paikalle rakennetaan perkolaatinkeräysallas joko rakentamalla se läpinäkyvästä muovista tai uusiokäyttämällä olemassa olevia vihanneslokeroita. Perkolaattialtaan pohjasta ja jääkaapin ja pakastimen väliseinämästä tehdään letkulle läpivienti. Perkolaattialtaan pohjan läpivientiin kiinnitetään ruostumattomasta teräksestä valmistettu siivilä, joka estää perkolaatin poistoletkun tukkeutumisen.

Perkolaattialtaan yläpuolelle ja jääkaapin reunoille sekä oveen rakennetaan kaltevat kumiluiskat, jotka ohjaavat jääkaapin reunoille mahdollisesti roiskuneen perkolaattinesteen perkolaattialtaaseen. Luiskien yläpuolelle rakennetaan kannatinhylly biokaasupanosta varten hyödyntämällä jääkaapissa olemassa olevaa hyllyä tai rakentamalla hylly ruostumattomasta teräksestä. Hyllyn kiinnityksessä voidaan käyttää olemassa olevia hyllynkiinnityskohtia. Hyllyn tulee olla rakenteeltaan sellainen, että se päästää perkolaattinesteen kulkeutumaan perkolaattialtaaseen. Hyllyä voidaan myös vahvistaa asentamalla sen alapuolelle jääkaapin runkoon kiinnitetty kierretanko.

Hyllyn päälle sijoitetaan biokaasupanos. Panostusta varten hankitaan jääkaapin mittoihin sopiva ja suorakaiteen muotoinen muoviastia, jonka pohjaan ja tarvittaessa sivulle porataan reikiä perkolaattinesteen valumista varten. Muoviastian pohjalle asetetaan nailonverkko, joka kiinnitetään pohjareijästä nippusiteillä. Verkon päälle asetetaan sepeliä suotokerrokseksi. Sepelin päälle tulee biokaasupanos, joka asetetaan pesupussin sisään.

Jääkaapin kattoon, biokaasupanoksen yläpuolelle tehdään läpivienti perkolaatin syöttöletkulle, läpivienti tuuletusputkelle sekä läpivienti kaasunpoistoletkulle. Jääkaapin takaseinälle tehdään läpivienti lämpötila-anturille.

Perkolaattisäiliö rakennetaan 50 litan PE-muovisäiliöön, joka sijoitetaan pakastinkaappiin. Säiliön kanteen tehdään läpiviennit kaasunpoistoletkulle, perkolaatin syöttöletkulle ja perkolaatin palautusletkulle. Kanteen asennetaan korkillinen mittausaukko. Pakastimen sivuseinälle tehdään läpiviennit kaasunpoistolle ja perkolaatin kierrätykselle.

Perkolaatin kierrätys toteutetaan pvc-muoviletkulla. Muoviletkun pää upotetaan perkolaattisäilön pohjalle kannen läpiviennin kautta. Muoviletku johdetaan pakastimen seinän läpiviennistä letkupumpulle ja sieltä jääkaapin läpiviennin kautta jääkaapin katon suihkuttimelle. Suihkuttimelta neste levi-

tetään panoksen päälle, josta se suotautuu sepeliin. Sepelistä neste suotautuu nailonverkon ja pohjareikien kautta perkolaattialtaaseen. Perkolaattialtaan neste johdetaan altaan pohjan, väliseinän ja perkolaattisäiliön kannen läpivientien kautta takaisin perkolaattisäiliöön.

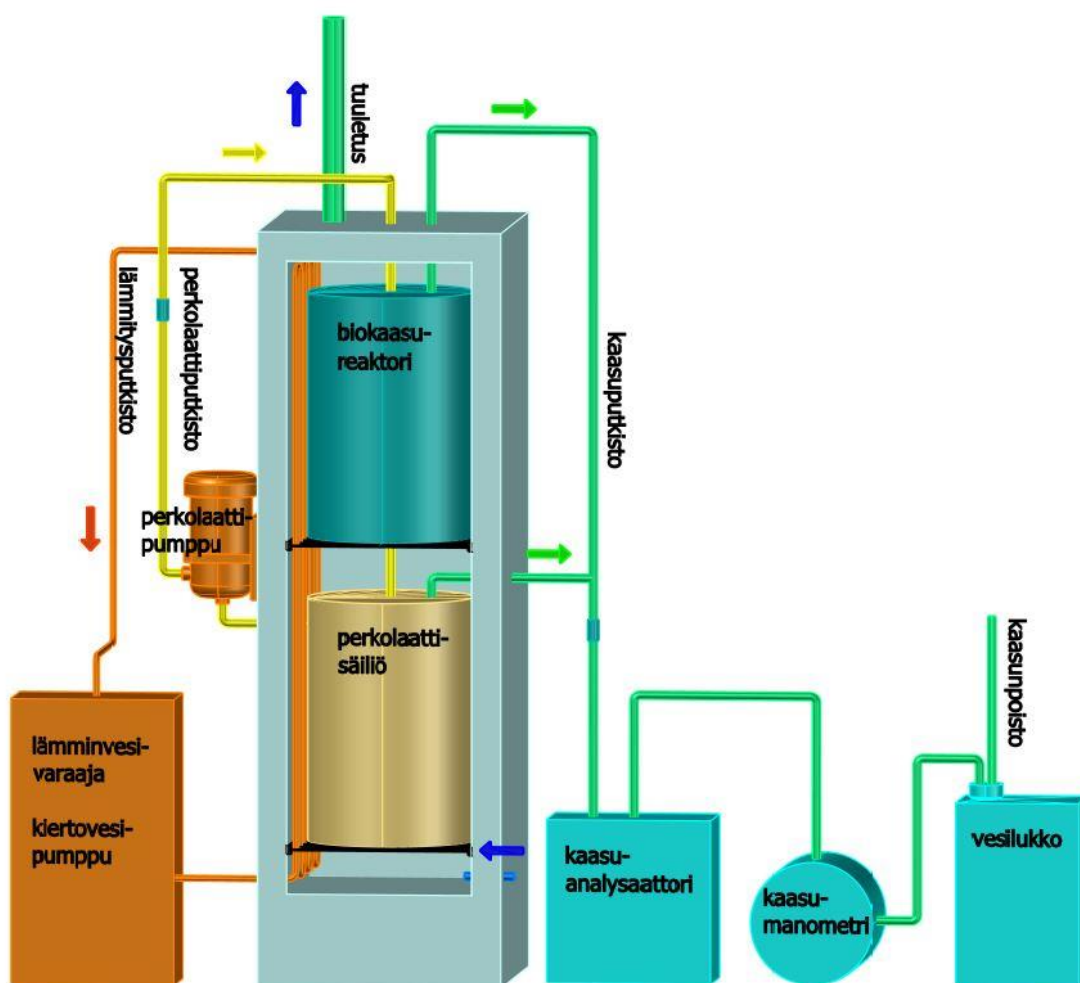
Kaasu johdetaan sekä reaktorista, että perkolaattisäiliöstä. Reaktorista kaasu johdetaan pvc-muoviletkulla reaktorin katon läpiviennin kautta laitteiston ulkopuolelle. Perkolaattisäiliöstä kaasu johdetaan pvc-muoviletkulla säiliön kannen sekä pakastimen seinän läpiviennin kautta laitteiston ulkopuolelle. Laitteiston ulkopuolella kaasulinjat yhdistetään ennen johtamista kaasuanalysaattorille ja kaasumanometrille. Manometriltä kaasu johdetaan vesilukon kautta tuuletusjärjestelmään.

Laitteistoon asennetaan lämmitysjärjestelmä, jolla sen sisätilat lämmitetään mesofiilistä biokaasuprosessia suosivaan lämpötilaan. Jääkaapin takaseinään asennetaan kupariputkesta lämmityselementti. Kupariputki johdetaan läpiviennistä jääkaapin sisälle, missä siitä taivutellaan lämmityselementti, josta putki johdetaan läpiviennin kautta ulos laitteistosta. Laitteiston ulkopuolelle asennetaan lämminvesivaraaja ja pumppu. Kupariputki yhdistetään lämminvesivaraajaan ja pumppuun. Varaajan lämmin vesi johdetaan pumpulle, josta se pumpataan pvc-muoviletkua pitkin kupariputkeen. Vesi kiertää lämmityselementin kautta ulos laitteistosta, josta se johdetaan pvc-letkun kautta takaisin varaajaan.

## 6.2 Versio 2

Ensimmäisessä versiossa reaktorin todettiin olevan epäkäytöllinen tilan puhtaanapidon ja huollon kannalta. Reaktori olisi kiinteä osa laitteistoa, mikä tekisi siivouksesta aikaa vievää ja hankalaa. Reaktorin letkujen tukkeutuessa tai muussa ongelmatilanteessa, jossa reaktori pitäisi avata, saattaisi avaamisesta aiheutua vaaratilanne. Vaikka laitteistoon suunniteltaisiin tuuletus, saattaisi kokematon laitteiston huoltaja aiheuttaa metaanikaasun vapautuminen laitteiston säilytystilaan.

Versiossa 2 jääkaappipakastin korvataan täysikorkealla jääkaapilla tai pakastimella. Reaktori rakennetaan muovitynnyniiriin. Laitteiston sisätila toimii lämmitystilana. Reaktori on helppo puhdistaa ottamalla reaktori ulos laitteistosta. Letkut ja liitokset on myös helppo tarkistaa ja huoltaa. Versio 2 havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9. AutoCAD-piirros versiosta 2. (Hämäläinen, 2020.)

Reaktori rakennetaan 60 litran PE-muovitynnynriin. Sen pohjaan tehdään läpivienti perkolaatinpoistoputkelle. Tynnyrin alaosaan jätetään noin 5 cm korkea tyhjä tila perkolaattinesteelle. Tynnyrin alaosaan asennetaan teräksinen reikälevy, jonka päälle kiinnitetään nailonverkko. Verkon päälle asetetaan noin 10 cm korkea kerros sepeliä. Sepelin päälle asetetaan biokaasutettava massa. Tynnyrin kanteen tehdään läpiviennit perkolaatin syötölle, kaasunkeräykselle ja lämpötila-anturille. Perkolaatin syötön läpivientiin rakennetaan suihkutin perkolaatin tasaisen levittämisen varmistamiseksi. Muovitynnyrille rakennetaan kannatintaso laitteiston yläosaan.

Perkolaattisäiliö sijoitetaan laitteiston alaosaan sitä varten rakennettavalle tasolle. Säiliö rakennetaan perkolaatin kierrätystä varten samalla tavalla kuin ensimmäisessä versiossa. Perkolaatin kierrätykselle tehdään laitteiston runkoon läpiviennit. Toinen läpivienti porataan laitteiston seinään perkolaatin kannen korkeudelle ja toinen laitteiston kattoon. Perkolaattisäiliöstä johdetaan pvc-letku kannen ja rungon läpiviennin kautta letkupumpulle ja sieltä edelleen pakastimen katon läpiviennin ja reaktorin kannen läpiviennin kautta reaktoriin. Perkolaattineste pumpataan reaktoriin kaasutettavan massan päälle. Perkolaattineste suotautuu massan ja sepelin läpi reaktorin alatilaan, josta se laskeutuu painovoimaisesti pvc-letkussa perkolaattisäiliöön.

Kaasunkeräyslinjaa varten tehdään läpiviennit laitteiston seiniin. Toinen läpivienti porataan perkolaattisäiliön kannen korkeudelle ja toinen reaktorin kannen korkeudelle. Reaktorista ja perkolaattisäiliöstä johdetaan pvc-letkut kansien läpivientien ja rungon läpivientien kautta laitteiston ulkopuolelle, missä letkut yhdistyvät. Yhdistynyt kaasuletku johdetaan kaasunmittausjärjestelmän kautta kuten versiossa 1.

Laitteiston seinän yläosaan tehdään kaksi läpiviientiä kupariselle lämmitysvesiputkelle. Kupariputki johdetaan laitteiston sisäpuolelle toisesta läpiviennistä, missä se taivutetaan lämmityselementiksi laitteiston seinän pituudelta ja johdetaan ulos toisesta läpiviennistä. Pvc-letkuilla yhdistetään kupariputken päät pumppuun ja lämminvesivaraajaan. Laitteiston takaseinästä reaktorin kannen korkeudelta tehdään läpivienti lämpötila-anturille, joka tuodaan lämpötilanohjausyksiköltä rungon läpivientin ja reaktorin kannen läpiviennin kautta kaasutettavan massan keskelle. Ohjausyksikkö säätelee lämmitysputken veden kiertoa ohjaamalla pumpun virransyöttöä.

## 7 SJOITTAMINEN

### 7.1 Sijoittamisen edellytykset

Biokaasulaitteisto tulee sijoittaa suljettuun tilaan. Tilan tulee olla vähintään 150 cm x 150 cm leveä ja 230 cm korkea. Oviaukon tulee olla vähintään 70 cm leveä ja 200 cm korkea. Laitteistotilan on oltava eristetty. Tilassa tulee olla sähköliitäntä ja sen läheisyydessä tulee olla vesipiste sekä pesupiste reaktorin puhdistusta varten. Tilassa tulee olla tehostettu ilmanvaihto. Kaasuvuodon sattuessa kaasu tulee olla johdettavissa laitteistotilasta ulkoilmaan. Ilmanpoistoputkenpään tulee olla sijoitettu ulos siten, että metaanikaasua ei pääse kulkeutumaan alueille missä se voi syttyä palamaan tai missä voi oleilla ihmisiä. Jotta laitteistotilassa voidaan turvallisesti liikkua tulee siellä olla toimiva metaani- ja hiilimonoksidivaroitin. Laitteistotilan pitää myös olla lukittava, jotta vain valtuutetut henkilöt pääsevät laitteistotilaan. Laitteisto tulee sijoittaa niin, että valvojan on mahdollista päästä sille kohtuullisen lyhyessä ajassa. Laitteistotilan ulkopuolelle tulee asettaa nähtäville seuraavat varoitukset. Varoitus hengenvaarasta. Varoitus räjähdysvaarasta, varoitus syttyvästä aineesta sekä varoitus, jossa kielletään sisäänpääsy asiattomilta henkilöiltä ja oleilu laitteistotilan läheisyydessä.

Mikäli laitteistolle soveltuvaa tilaa ei löydetä, voidaan sellainen rakentaa. Sisätilaan rakennettaessa 50 cm x 50 cm rimasta tehdään seinä- ja kattokehikot. Yhteen seinäkehikkoon tehdään ovelle vähintään 70 cm leveä ja 200 cm korkea aukko. Kehikot päällystetään ulkoa vanerilla ja tarvittaessa villoitetaan. Sisäpuolelta tilan seinät ja katto päällystetään ilmansulkumuovilla, joka tiivistetään sulkuteipillä. Sulkumuovi päällystetään vanerilla. Lattian ja seinärunkojen väli voidaan tiivistää kitillä. Ulkotilaan asennettaessa kehikko voidaan asentaa kevytsoraharkkojen tai betonilaattojen päälle. Seinäkehikot tulee villoittaa. Rakennuksen katosta on tällöin tehtävä harjakatto. Katto voidaan pinnoittaa pelleillä tai huovilla. Laitteistotilan lämmitys voidaan toteuttaa esimerkiksi vesikiertoisella patterilla ja pienellä lämminvesivaraajalla.



## 7.2 Sijoituspaikka

Insect Savo –hankkeessa kaavailtiin kuivamädätyslaitteisto sijoitettavaksi Iisalmeen. Kuivamädätyslaitteiston rakentamisen edetessä Kuopion ympäristötekniikan jätevesilaboratoriosta vapautui yksi kylmiöistä mahdolliseksi laitteiston sijoituspaikaksi. Kylmiön todettiin täyttävän laitteiston sijoittamiselle asetetut vaatimukset. Laitteisto päätettiin lopulta sijoittaa Kuopioon kolmesta syystä. Hankkeeseen Kuopiosta osallistuneilla oli enemmän aikaa laitteistoa koskevaan käytännön työhön. Laitteiston kehittämiseen tarvittava osaaminen erityisesti sähkötekniikan osalta oli Kuopiossa. Laboratoriolaitteiden ja välineiden sijainti oli Kuopiossa.

## 8 LAITTEISTON OSAT

Laitteistossa eri vaiheissa käytetyt osat esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kuivamädätyslaitteiston osat. (Hämäläinen, 2020.)

	<b>REAKTORI</b> PE-muovitynnyri, kannellinen, 60l
	<b>PERKOLAATTISÄILIÖ</b> PE-muovitynnyri, kannellinen, 50 l
	<b>LAITTEISTON RUNKO</b> Täysikorkea pakastin, käytetty

	<p>LETKUPUMPPU</p> <p>Verderflex smart s30</p>
	<p>KAASUMANOMETRI</p> <p>Ritter TG 1/2</p>
	<p>KAASUNANALYSAATTORI</p> <p>Biobasic</p>
	<p>LÄMPÖTILANOHJAUSYKSIKKÖ</p> <p>Anly electronics</p>
	<p>YHDISTETTY LÄMMINVESIVARAAJA JA KIERTOVIIPUMPPU</p>

	KAASUPUSSI Jumpapallo
	KAASUPUSSI Alumiinifoliopussi, 50l

## 9 LAITTEISTON RAKENTAMINEN

### 9.1 Runko

Laitteistolle etsittiin runkoa kirpputoreilta ja kaatopaikoilta sekä kylmälaitteiden huoltoliikkeiden varastoista. Tavoitteena oli löytää ammattikäyttöön tarkoitettu, tilava jääkaappi tai pakastin. Jätekuon Heinälamminrinteen jätekeskukselta käytiin tutkimassa sopivaa runkoa, sitä kuitenkaan löytämättä. Käytöstä poistettujen jääkaappien kontista varattiin kotitalouskäytöstä poistettu täysikorkea jääkaappi. Jätteenkäsittelijöitä pyydettiin olemaan yhteydessä, jos jätekeskukselle tuotaisiin tilavampi laite. Samoin pyydettiin huoltoliikkeitä olemaan yhteydessä, jos liikkeiltä tulee poistettavaksi suurta-louskeittiöjääkaappia tai -pakastinta.

Paikallisella kirpputorilla oli myytävänä täysikorkea kotitalouskäytössä oleva pakastin kahdella erillisellä ovella. Sen katsottiin olevan parempi vaihtoehto kuin kaatopaikalta varattu laite. Yhteydenotot tilavammasta laitteesta ei saatu, joten hankittiin kirpputorilta löydetty pakastin. Pakastin käytiin hakemassa microkadun ympäristötekniikan halliin. Pakastimen runko esitetty kuvassa 10 ja 11.

Kylmäkoneen huoltoliikkeen huoltomies kävi poistamassa kylmäaineet pakastimesta, jonka jälkeen laite siirrettiin ympäristötekniikan pajalle. Pakastimen sisältä poistettiin lauhdutinputkisto ja ylimääräiset hyllylevyt. Paikoilleen jätettiin keskihylly reaktoritynnyriä varten ja alin hylly perkolaattisäiliötä varten. Sisätilasta poistettiin hyllyjen kiinnikkeet ja valorasia. Näkyvät sähköjohdot poistettiin.



Kuva 10. Kuivamädätyslaitteiston runko. Lämmityselementti asennettuna laitteiston seinään. (Hämäläinen, 2020.)



Kuva 11. Kaasu- ja perkolaattiletkut ja niiden läpiviennit. Runkoon kiinnitetty vanerilevy ja lämpötilanohjausyksikkö. (Hämäläinen, 2020.)

Pakastimen vasemman seinän yläosaan porattiin lämmityspotkille kaksi reikää 10 mm leveällä rasiaterällä. Kupariputki taivutettiin lämmityselementin (kuva 10) osiksi, jotka sidottiin toisiinsa kuituvahvisteisella 12/18 pvc-letkulla ja letkuliittimillä. Lämmityselementin kuparipäät johdettiin laitteen ulkopuolelle runkoon tehdyistä rei'istä. Reiät tiivistettiin liimamassalla. Reaktorihyllyn kestävyyttä haluttiin vahvistaa asentamalla hyllyn alle kierretanko. Laitteen sivuille hyllyn alle porattiin reiät, joiden läpi kierretanko asetettiin paikalleen ja kiristettiin runkoon muttereilla.

Perkolaatti- ja kaasuletkuille porattiin reiät laitteen rungon oikealle seinälle. Kaksi reikää porattiin perkolaattisäiliön kannen korkeudelle ja kaksi reaktorin kannen korkeudelle. Kahteen ylemmän ja yhteen alemman reiän läpi työnnettiin kuituvahvisteiset 12/18 pvc-letkut. Toisen alemman reiän läpi työnnettiin kuituvahvisteinen 16/22 pvc-letku perkolaatin imuletkuksi. Letkuihin jätettiin reilusti pituutta laitteiston ulkopuolella, koska liitettävien instrumenttien tarkkaa paikkaa ei ollut vielä tiedossa. Perkolaatti- ja kaasuletkut asennettuna kuvassa 11. Biokaasureaktorista ja perkolaattisäiliöstä lähtevät kaasuletkut yhdistettiin t-haaraliittimellä (t-1). Letkujen rungon sisäisiin päihin kiinnitettiin pikaliittimet.

Rungon kattoon porattiin rasiaterällä reikä kuituvahvisteiselle 25/32 pvc-tuuletusletkulle. Letkuun asennettiin sulkuventtiili ja letku kiinnitettiin porattuun reikään liimamassalla. Sulkuventtiili kiinnitettiin tukevasti pakastimen päälle teräslevyllä. Tuuletusjärjestelmän osat esitetty kuvissa 12 ja 13. Tuuletusta varten porattiin reikä kaapin alaosaan. Reikään asennettiin paineilmaletku ja venttiili paineilmapuhallusta varten. Reikä tiivistettiin liimamassalla. Pakastimen takaseinän vanhan lämpöanturin reistä työnnettiin laitteen sisälle lämpötila-anturi.





Kuva 12. Laitteiston tuuletuksen poistoilman venttiili ja -letku. (Hämäläinen, 2020.)



Kuva 13. Laitteiston tuuletuksen paineilmaliitin. (Hämäläinen, 2020.)

Rungon oikealla ulkoseinälle asennettiin vesivanerista kiinnityslevy (kuva 11) instrumenteille. Levyyn kiinnitettiin lämpötilan ohjausyksikkö (kuva 11) ja biobasic-kaasuanalysaattori. Kaasuanalysaattori asennettuna runkoon kuvassa 14. Lämpötila-anturi yhdistettiin lämpötilan ohjausyksikköön. Pakastimen oviin kiinnitettiin metalliset salvat vetoniiteillä.

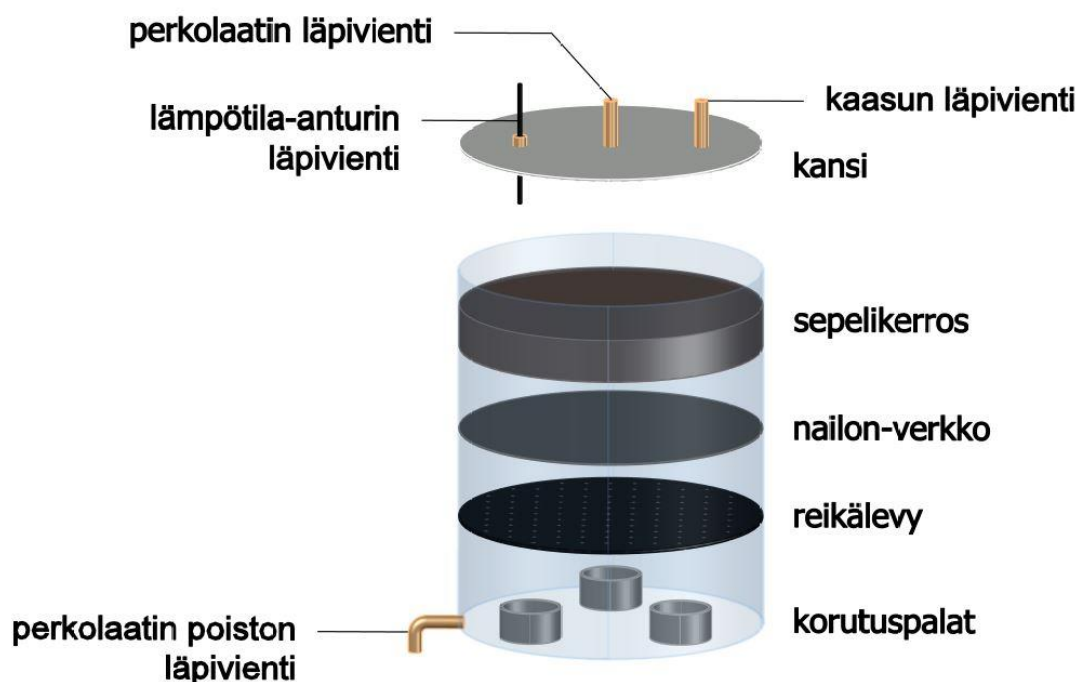


Kuva 14. Biobasic kaasuanalysaattori (Hämäläinen, 2020.)

## 9.2 Reaktori

Muoviseen 60 litran tynnyrin alaosaan lähelle pohjaa porattiin reikä läpiviennille. Läpivienti asennettiin paikoilleen ja tiivistettiin liimamassalla. Läpivientiin kiinnitettiin kudsvahvistettu 19/25 pvc-letku, jonka toiseen päähän kiinnitettiin kierrettävä liitin. Ruostumattomasta teräksisestä reikälevystä sahattiin tynnyrin alaosan sisähalkaisijan kokoinen ympyrä. Sen päälle kiinnitettiin nailonverkko (silmäkoko 1,5 mm) nippusiteillä. Tynnyrin pohjalle tehtiin 110 mm halkaisijaltaan olevasta muovisesta viemäriputkesta 7 cm korkeita rengaskappaleita tukemaan ruostumattomasta teräksestä sahattua levyä. Teräslevy asetettiin paikalleen muovikappaleiden päälle ja sen päälle kaadettiin 10 cm korkea kerros sepeä.

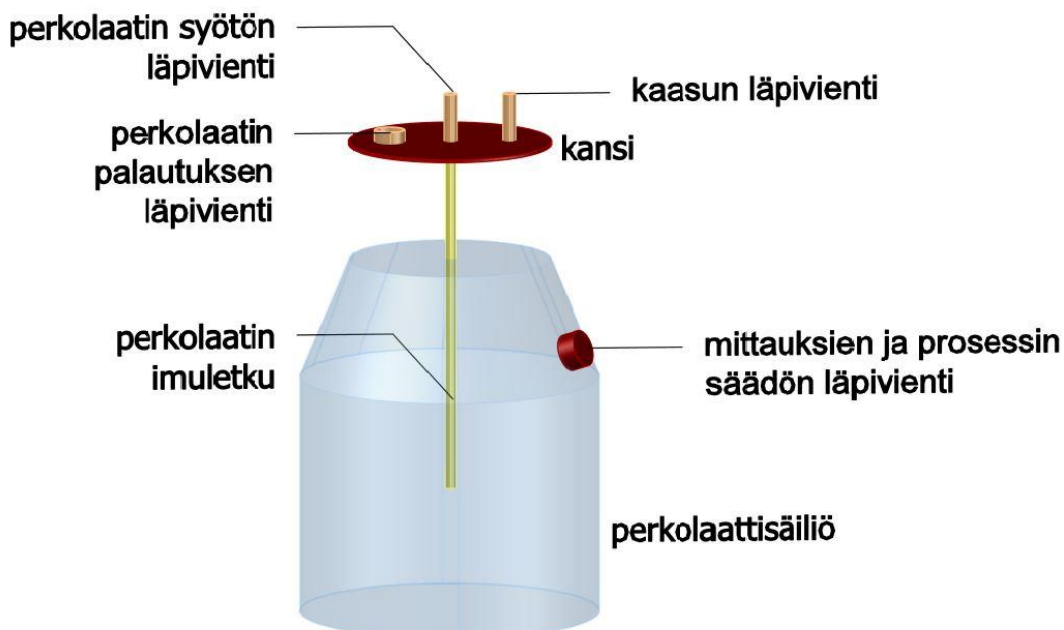
Reaktorin kanteen porattiin reiät kaasu- ja perkolaattiletkuille sekä lämpötila-anturille. Kaasu- ja perkolaattiletkujen läpiviennit kiinnitettiin kanteen ja tiivistettiin liimamassalla. Läpivienteihin kiinnitettiin noin 20 cm pitkät kuituvahvistetut 12/18 pvc-letkut. Letkujen päihin liitettiin pikaliittimet letkuliittimillä. Lämpötila-anturille kiinnitettiin kanteen oma kuristava läpivienti. Reaktorin rakenne esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Reaktorin rakenne. AutoCAD-piirros. (Hämäläinen, 2020.)

### 9.3 Perkolaattisäiliö

Muovisen 50 litran tynnyrin kanteen porattiin reiät kaasun- ja perkolaatin syötön läpiviennille sekä perkolaatin paluuletkun läpiviennille. Kaasun läpivienti kiinnitettiin paikalleen ja tiivistettiin liimamassalla. Perkolaatin syötön reiästä työnnettiin kannen läpi kuituvahvisteista 12/18 pvc-letkua niin, että letkun pää ulottui säiliön pohjalle kannen ollessa paikallaan. Letku katkaistiin niin, että sitä jäi kannen ulkopuolelle 20 cm. Kannen reikä letkun ympäriltä tiivistettiin liimamassalla. Kaasun läpivientiin liitettiin 20 cm kuituvahvisteinen 12/18 pvc-letku. Kannen letkun päihin liitettiin pikaliittimet letkuliittimillä. Säiliön kylkeen porattiin reikä ja siihen liimattiin muovisen kanisterin suu ja korkki pH:n säätöä varten. Perkolaattisäiliön rakenne esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Perkolaattisäiliön rakenne. AutoCAD-piirros. (Hämäläinen, 2020.)



#### 9.4 Kokoaminen

Perkolaattisäiliö asetettiin paikoilleen tarkistuskorkki suunnattuna vinosti ulospäin. Asennettu perkolaattisäiliö kuvassa 17. Biokaasureaktori asetettiin paikoilleen perkolaatin poistoliitin pakastimen takakulmaa päin ja kierrättämällä perkolaatin poistoletku hyllyyn tehdystä aukosta perkolaattisäiliön liittimelle. Kaasu- ja perkolaatinkierrätysletkut yhdistettiin paikoilleen pikaliittimillä ja perkolaatin paluuletku kierrettävällä liittimellä.



Kuva 17. Perkolaattisäiliö paikoillaan laitteistossa. Reaktorista tuleva perkolaatin poistoputki kiinnitettyinä. (Paukkonen, 2019.)



Kuva 18. Laitteistotilan ilmanpoistoaukko. Laitteiston kaasunpoistoletkujen kiinnitys. (Hämäläinen, 2020.)

Kuivamädätyslaitteistoa haluttiin aluksi testata ilman kaasuanalysointia ja kaasumanometriä. Laitteisto siirrettiin ympäristötekniikan jätevesilaboratoriosta varattuun kylmiöön. Perkolaattisäiliöstä tuleva perkolaattiletku yhdistettiin letkupumpun letkuun ja letkupumpun letkun toinen pää yhdistettiin reaktorin perkolaatin tuloletkuun letkuliittimillä. Sulkuventtiililtä (s-1) johdettiin kuituvahvisteinen 12/18 pvc-letku jumppapallolle, jossa letku kuristettiin jumppapallon liittimeen sopivalla muoviletkulla.

Lämminvesivaraaja ja pumppu siirrettiin kylmiön pöydälle. Pumpun lähtöliittimestä johdettiin kuituvahvisteinen 12/18 pvc-muoviletku pakastimen kupariputkelle. Toiselta kupariputkelta johdettiin samanlainen muoviletku lämmönvesivaraajan tuloliittimeen. Pumpun sähköpistoke liitettiin lämmönohjausyksikölle. Letkupumpun virtajohto liitettiin kellokytkimelle.

## 10 TESTAUS

Laitteiston lämmitysjärjestelmää ja perkolaatinsyöttöä testattiin ennen ensimmäistä koeajoa. Lämmitysvesivaraaja ja pumppu olivat olleet poissa käytöstä pitkän aikaa. Niiden toimivuudesta ei ollut varmuutta.

Varaaja täytettiin kylmällä hanavedellä ja laitteet kytkettiin päälle. Lämminvesivaraajan todettiin toimivan moitteettomasti, mutta huomattiin ettei pumppu kierrättänyt vettä. Lämmitysputkistoon lisättiin vettä, koska yhtenä syynä ongelmaan pidettiin ilman kertymistä putkistossa. Veden lisäys ei kuitenkaan auttanut, joten pumpun pesä päätettiin aukaista. Pesään todettiin kertyneen runsaasti ruostetta, mikä esti pumpun ratasta pyörimästä. Pumpun pesästä irrotettiin ruoste raspilla hankaamalla ja huuhtelemalla pesää suolahapolla. Huoltotoimenpiteen jälkeen pumppu alkoi kierrättämään vettä. Lämmönohjausyksiköstä säädettiin laitteiston sisätilan tavoitearvoksi 38°C. Lämpötila-anturi roikkui testin aikana laitteiston ylemmän osion puolivälissä. Laitteiston lämpötila nousi tavoitearvoon. Lämmitysjärjestelmää pidettiin päällä viikonlopun yli. Järjestelmän todettiin toimivan suunnitellusti ja pitävän laitteiston sisälämpötilan tasaisena.

Letkupumpun toimivuutta testattiin kierrättämällä perkolaatinsyöttöjärjestelmän läpi hanavettä. Letkupumpun todettiin toimivan suunnitellusti. Letkupumpun nopeudeksi asetettiin 180 rpm. Letkupumppu syöttönopeus asetetulla kierrosnopeudella oli 2,25 l/min.

## 11 KOEAJOI

### 11.1 Toteutus

Ensimmäinen koeajo aloitettiin 23.11.2019. Pesupussiin täytettiin 6,25 kg säilörehua, joka oli haettu Luken Maanigan tutkimustilalta. Biokaasulaitteiston panostus kuvassa 19. Ensimmäisessä koeajossa käytettiin suotomateriaalina sepelin lisäksi haketta. Haketta lisättiin noin 3 cm sepelin päälle. Reaktorin hakekerros kuvassa 20. Säilörehupussi asetettiin hakkeen päälle biokaasureaktoriin. Reaktorin

lämpötilan tavoitearvoksi asetettiin 38°C. lämpötila-anturi työnnettiin reaktorin kannen läpi ja asetettiin syvälle säilörehuun. Reaktorin kansi suljettiin ja perkolaatti sekä kaasuletkut kiinnitettiin paikalleen pikaliittimillä. Perkolaattisäiliöön kaadettiin aiemman säilörehulle tehdyn panospullobiokaasukokeen mädätysjäännöstä. Mädätysjäännös siivlöitiin ennen lisäämistä perkolaattisäiliöön. Biokaasupanospulloista saatiin 29,86 kg mädätysjäännöstä



Kuva 19. Biokaasupanoksen valmistaminen. (Pulkkinen, 2020.)



Kuva 20. Hakekerros reaktorissa. Panos asetettiin hakkeen päälle koeajossa 1. (Hämäläinen, 2020.)

perkolaatin pohjaksi. Perkolaattisäiliöön lisättiin vielä 9,9 kg hanavettä. Ympäriä ja vettä oli perkolaattisäiliössä yhteensä 39,85 kg. Perkolaattineesteeseen lisättiin 21 g kalsiumbikarbonaattia puskuroimaan pH:n laskua. Perkolaattisäiliön kansi kierrettiin kiinni ja säiliö asettiin paikalleen biokaasulaitteistoon. Reaktorin perkolaattipoistoletku yhdistettiin perkolaattisäiliön kannen liittimeen ja perkolaattinkierrätysletku sekä kaasuletku yhdistettiin pikaliittimillä. Laitteiston ovet suljettiin salvoilla. Letkupumpun nopeudeksi säädettiin 180 rpm. Kellokytkimellä säädettiin letkupumppu syöttämään reaktoriin perkolaattia 4 kertaa vuorokaudessa ja 15 minuuttia kerrallaan.

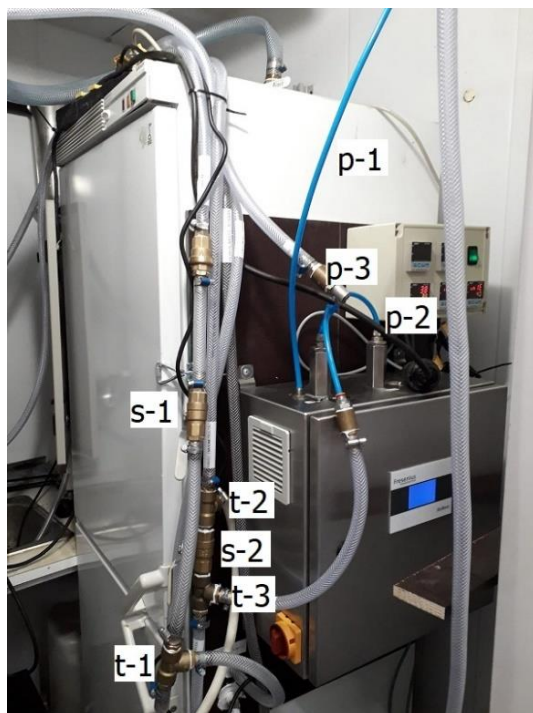
Kaasunmäärämittaus toteutettiin aluksi jumppapallolla. Täydestä jumppapallosta määritettiin ympärysmitta, jonka avulla laskettiin kaasun tilavuus pallossa. Kannettavalla kaasuanalyysaattorilla mitattiin kaasun koostumus. Muutostyön jälkeen mittaukset tehtiin kaasumanometrillä ja biobasic-kaasuanalyysaattorilla. Koe lopetettiin 2.1.2020. Kokeen pituus oli 24 vuorokautta. Mädätysjäännöstä otettiin talteen seuraavaa koetta varten ja mädätysjäännöksestä tehtiin ts/vs-määritykset.

## 11.2 Muutokset

Jumppapallon liittimen huomattiin kesken koeajon irronneen kiinnityksestään. Jumppapallo päätettiin poistaa laitteistosta. Laitteistoon asennettiin biobasic-kaasuanalyysaattori sekä kaasumanometri. Kaasulinjaa muutettiin aluksi niin, että reaktorista ja perkolaattisäiliöstä tuleva kaasu johdettiin t-haaraliittimestä (t-1) kuituvahvisteisella 12/ 18 pvc-letkulla supistimelle, josta 6 mm halkaisijaltaan oleva paineilemätke johdettiin biobasic-kaasuanalyysaattorin tuloliitäntään. Analyysaattorin puhdasilmanottoon liitettiin 6 mm halkaisijaltaan oleva paineilemätke (p-1), joka johdettiin kylmiön ulkopuolelle kylmiön katon kautta. Kaasuanalyysaattorin lähtöliitännästä kaasu johdettiin 6 mm halkaisijaltaan olevalla paineilemätkellä supistimelle, josta kuituvahvisteinen 12/ 18 pvc-letku johdettiin kaasumanometrin tuloliitäntään. Manomentriltä kaasu johdettiin kuituvahvisteisella 12/18 pvc-muoviletkulla kahden litran muovikanisteriin, joka toimii vesilukkona. Letku johdettiin kanisterin kannen läpi sen pohjalle. Kanisterin kannesta johdettiin toinen kuituvahvisteinen 12/18 pvc-muoviletku kylmiön poistoilmaventtiilille. Kylmiön poistoilmaventtiili kuvassa 18. Todeun perkolaattinesteen pH:n laskun seurauksena perkolaattineesteeseen lisättiin 150 g kalsiumbikarbonaattia.

Biobasic-kaasuanalyysaattoria testattaessa todettiin sen huuhtelevan anturit puhtaalla ilmalla ja johtavan poistoilman lähtöliitäntään. Tämä aiheutti sen, että manometrin lukema vääristyi. Analyysaattorin ja manometrin paikkaa oli vaihdettava. Vaihdon ongelmana oli biobasicin näytekaasun tarve, jonka arvioitiin olevan noin 9 l/mittaus. Analyysaattori ei tulisi saamaan tarpeeksi näytekaasua, jos manometri olisi kaasulinjassa ennen sitä. Kaasulinjaan ennen analyysaattoria päätettiin lisätä kaasupussi, josta biobasic voisi ottaa tarvittavan näytekaasun. Analyysaattorin tuloliitäntään yhdistetty kuituvahvisteinen 12/18 pvc-letkun pää liitettiin manometrin tuloliittimelle. Manometrin lähtöliitännästä johdettu kuituvahvisteinen 12/18 pvc-letku yhdistettiin t-haara-liittimelle (t-2) ja t-haara-liitin (t-2) liitettiin sulkuventtiilille (s-2). T-haaraliittimen (t-2) perään liitettiin t-haaraliitin (t-3). Ensimmäiseen t-haaraan (t-2) liitettiin kuituvahvisteinen 12/18 pvc-letku, joka johdettiin kaasupussille, jossa letku kuristettiin kaasupussin liittimeen sopivalla muoviletkulla. Toisesta t-haarasta (t-3) johdettiin kuituvahvisteiset 12/18 pvc-muoviletkut kaasuanalyysaattorin tuloliittimen 6 mm halkaisijaltaan olevalle

paineletkulle (p-2) sekä vesilukkoon. Kaasuanalysaattorin lähtöliitännän paineilmaletku (p-3) yhdistettiin kuituvahvisteiseen 12/18 pvc-letkuun, joka johdettiin ilmanpoistoaukolle. Kun kaasupussiin oli kertynyt tarpeeksi kaasua mittausta varten, testattiin biobasic-kaasuanalysaattoria. Muutostyö osoittautui toimivaksi. Kaasuletkujen liitokset esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Kuivamädätyslaitteiston kaasuliitännät. (Hämäläinen, 2020.)

### 11.3 Tulokset

Kuivamädätyslaitteisto tuotti paljon kaasua heti käynnistämisen jälkeen. Metaanin osuus kaasusta oli kuitenkin hyvin pieni. Metaanin tuotanto alkoi kasvaa reilun viikon päästä kokeen aloittamisesta. Syynä alun alhaiseen metaanin tuotantoon oli todennäköisesti reaktorin pH:n lasku, jota indikoi havaittu perkolaattinesteen pH:n lasku. Syynä pH:n laskuun oli todennäköisesti hapan säilörehu ja liian vähäinen natriumbikarbonaatin määrä perkolaattinesteessä. Metaanin osuus kaasusta vaihteli välillä 0,5 % - 64,8 % nousten yli 50 prosentin jo ennen kokeen puoliväliä ja pysyen sen yläpuolella kokeen loppuun saakka. Kuivamädätyslaitteisto tuotti metaania yhteensä 197,94 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS. Metaanin kumulatiivinen tuotto havainnollistettu kuvaajassa 1.

Säilörehun metaanituottopotentiali on kokeissa (Lehtomäki 2006, 41) todettu rehun koostumuksen mukaan olevan 306-372 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS. Kokeet ovat kestäneet 42-94 vuorokautta. Laboratoriomittakaavan tutkimuksessa (Lehtomäki, 2006, 59) oli 30 päivän yksivaiheisessa panoskokeessa säilörehun metaanituotannoksi saatu 60 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS.

## 11.4 Johtopäätökset

Kuivamädätyskokeella ei ollut tarkoitus vielä maksimoida metaanintuotantoa vaan testata laitteiston toimivuutta. Huomioiden kirjallisuudessa esitetyt metaanintuottopotentialit sekä kokeen luonne, koe onnistui hyvin ja metaanintuotto oli hyvää.

Perkolaatin todettiin kastelleen biokaasupanosta liikaa ensimmäisessä koeajossa. Tämän vuoksi päätettiin toisessa koeajossa perkolaatinkierrätys säätää 5 minuuttiin ja neljään kertaan vuorokaudessa. Letkupumpun kierrosnopeudeksi säädettiin arvoon 100 rpm. Kuivamädätyslaitteiston alkaaliteetin ja haihtuvien rasvahappojen (VFA) mittausta päätettiin aloittaa toisessa koeajossa. Hake sekoittui kokeen aikana sepeliin ja reaktorin puhdistus hankaloitui. Hake päätettiin jättää pois tulevista koeajoista. Sepeli päätettiin siirtää pesupussin sisään sen puhdistamisen helpottamiseksi.

## 12 KOEJO 2

### 12.1 Toteutus

Toinen koeajo aloitettiin 3.1.2020. Luken Maaningan tutkimustilalta haettiin säilörehua biokaasutettavaksi materiaaliksi. Biokaasupanosta varten sekoitettiin 6,195 kg säilörehua ja 0.750 kg ensimmäisessä koeajossa mädätettyä jäännöstä. Pesupussi täytettiin seoksella ja asetettiin reaktoriin. Perkolaattineesteeseen lisättiin 200 g kalsiumbikarbonaattia puskuroimaan pH:n laskua. Toisessa koeajossa käytettiin samaa perkolaattineestettä kuin ensimmäisessä koeajossa. Perkolaattisäiliössä perkolaattia oli 40 kg. Laitteisto käynnistettiin. Laitteiston lämpötilan tavoitearvoksi asetettiin 38°C.

Laitteisto tuotti käynnistämisen jälkeen vähän biokaasua. Perkolaatinkierrätystä lisättiin. Perkolaatinkierrätys säädettiin ensin kymmeneen minuuttiin ja kolmeen kertaan vuorokaudessa. Kierrätysaika pidennettiin lopulta viiteentoista minuuttiin. Kaasuntuotto ei merkittävästi näistä toimenpiteistä lisääntynyt. Perkolaattineesteeseen lisättiin kokeen aikana Luken Maaningan biokaasulaitoksen mädätysjäännöstä. Koeajo päätettiin lopettaa 22.1.2020. Kokeen pituus oli 36 vuorokautta.

### 12.2 Muutokset

Reaktoriin asennettiin kuituvahvisteinen 12/18 pvc-letku. Teräslevyn pinnasta reaktorin yläosaan. Muutostyön tarkoituksena oli tasata painetta kaasunmittauksen aikana ja estää siitä mahdollisesti aiheutuvan kaasumanometrin lukeman muutos.

### 12.3 Tulokset

Toisessa koeajossa metaanintuotto alkoi lupaavasti, mutta hiipui nopeasti. Kuivamädätyslaitteisto tuotti metaania yhteensä 191,05 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS. Metaanin kumulatiivinen tuotto havainnollistettu kuvaajassa 1. Metaanintuotto oli ensimmäistä koeajoa heikompaa, mutta orgaanisen aineen osuuteen verrattuna vain hieman pienempää kuin ensimmäisessä koeajossa. Alkaaliteetti säilyi korkeana koko koeajon ajan.

## 12.4 Johtopäätökset

Koeajon alhaisen metaanintuoton oletettiin johtuvan perkolaattinesteen liian vähäisestä määrästä reaktorissa, mikä johti tutkittavan massan kuivumiseen ja sitä kautta biokaasuprosessin hiipumiseen. Toimenpiteellä ei ollut merkittävää vaikutusta metaanintuottoon, joten syyksi oletettiin perkolaattinesteen alhainen orgaanisen aineksen osuus. Samaa perkolaattinestettä oli käytetty ensimmäisessä koeajossa. Orgaaninen aines oli syötetty perkolaatin kierrätyksessä massaan, johon se oli suotautunut ja hajonnut biokaasuksi. Ympin lisäys perkolaattinesteeseen nosti metaanintuotantoa hetkellisesti, mutta metaanintuotto hiipui uudestaan. Seuraavassa koeajossa päätettiin lisätä siivilöimätöntä ympäiä perkolaattinesteeseen.

## 13 KOEAJO 3

### 13.1 Toteutus

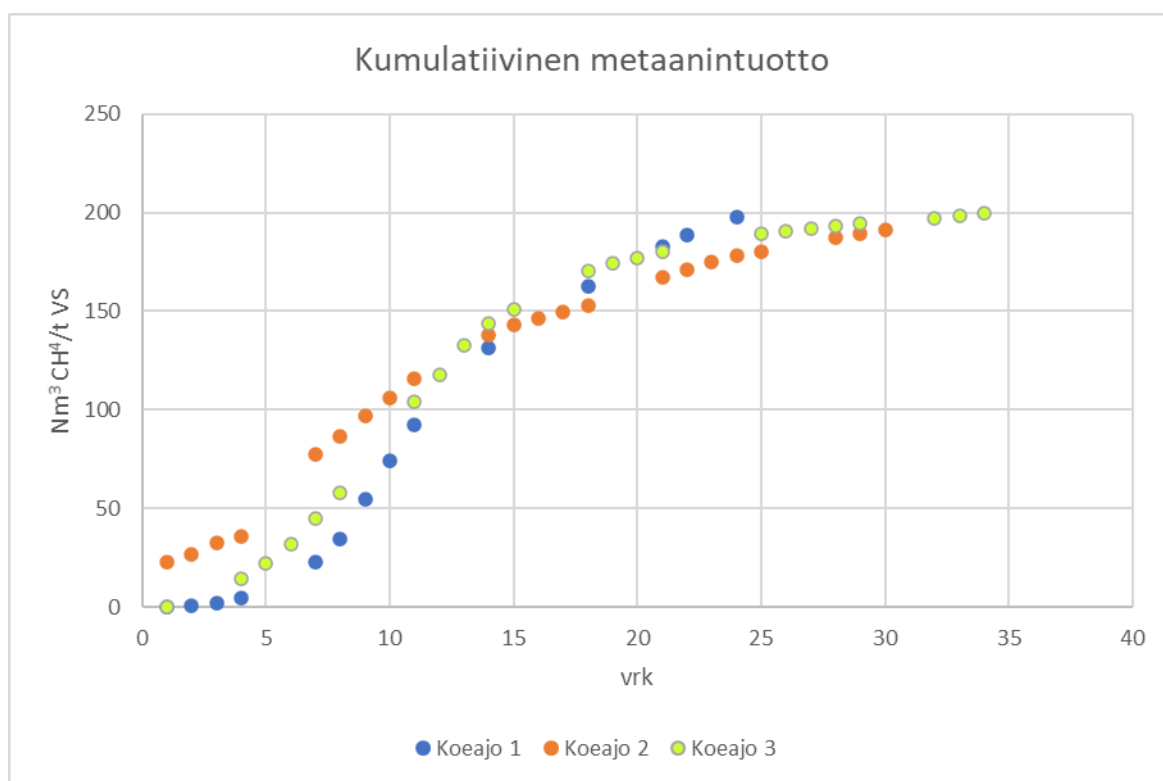
Kolmas koeajo aloitettiin 7.2.2020. Kokeessa käytettiin tutkittavana materiaalina Luken Maaningan tutkimustilalta haettua säilörehua. Panos oli säilörehun ja toisen koeajon mädätysjäännöksen sekoitus. Säilörehua panoksessa oli 6,076 kg ja mädätysjäännöstä 1,050 kg. Perkolaattisäiliöön lisättiin siivilöimätöntä Luken Maaningan biokaasulaitoksen mädätysjäännöstä. Perkolaattinesteeseen lisättiin 200 g kalsiumbikarbonaattia puskuroimaan pH:n laskua. Siivilöimättömän mädätysjäännöksen oletettiin nostavan perkolaatin vs-pitoisuutta ja lisäävän kaasuntuotantoa. Perkolaattinestettä syntyi yhteensä 37,8 kg perkolaattisäiliöön. Koeajo päätettiin lopettaa 11.3.2020. Kokeen pituus oli 33 vuorokautta.

### 13.2 Muutokset

Siivilöimätön perkolaattineste aiheutti perkolaattisäiliön imuletkun tukkeutumisen. Perkolaattineste jouduttiin tästä syystä siivilöimään, jotta tukkeutumista ei uudestaan tapahtuisi.

### 13.3 Tulokset

Kolmannessa koeajossa kuivamädätyslaitteisto tuotti metaania yhteensä 199,42 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS. Metaanin kumulatiivinen tuotto havainnollistettu kuvaajassa 1. Metaanintuotto oli aikaisempiin kokeisiin verrattuna kaikkein korkein orgaanisen aineen määrään suhteutettuna.



Kuvaaja 1. Kuivamädätyslaitteiston koeajojen kumulatiivinen metaanintuotto. (Hämäläinen, 2020.)

#### 13.4 Johtopäätökset

Perkolaatin kierrätysmäärän lisääminen ja ympin lisääminen kokeen alussa todennäköisesti tehostivat metaanintuotantoa. Kolmannessa koeajossa mitattu korkea alkaaliteetti osoitti prosessin hyvää puskurointikykyä. Myös VFA/alkaaliteetti -suhde osoitti prosessin olevan stabiili.

### 14 VALMIIN LAITTEISTON TARKASTELU

#### 14.1 Tavoitteiden toteutuminen

Suunnittelun ja rakentamisen tavoitteena oli liikuteltava pilot-luokan kuivamädätyslaitteisto, jolla voidaan tutkia erilaisten materiaalien metaanintuottopotentiaalia ja soveltuvuutta kuivamädätykseen. Tavoitteena oli myös, että laitteiston tuottaman mädätysjäännöksen soveltuvuutta hyönteisten ravintona voidaan testata.

Laitteisto on onnistuttu rakentamaan pienellä budjetilla hyödyntämällä olemassa olevia rakenteita ja ympäristötekniikan laboratoriossa käytettyjä osia. Laitteisto on osoittautunut koeajoissa toimivaksi kokonaisuudeksi, jolla voidaan kuivamädättää säilörehua. Laitteisto on osoittautunut uusissa koeajoissa toimivaksi myös salaattien, yrttien sekä metsäteollisuuden vesienkäsittelyn sivuvirtojen käsittelyssä. Laitteiston lämmitys, perkolatinkierto, kaasunkeräys sekä mittalaitteet toimivat suunnitelmusti. Laitteisto on myös haluttaessa liikuteltavissa toiseen kohteeseen. Suunnitelmien kehittyessä



tavoitteeksi asetettiin mittaustiedon automaattinen kerääminen, tallennus sekä analysointi. Tarvittavat komponentit hankittiin, mutta järjestelmää ei päästy asentamaan vielä tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikana.

## 14.2 Kustannukset

Kuivamädätyslaitoksen rakentamisen budjetti oli tiukka. Hankkeen edetessä avautui mahdollisuus rakentamisen lisärahoitukseen, niiltä osin kuin se olisi laitteiston kehityksen kannalta tärkeää. Laitteistoon päätettiin tästä syystä lisätä kaasua mittamaan ympäristötekniikan laboratorion käytössä ollut biobasic-kaasuanalysaattori, jonka huoltaminen olisi alkuperäisen budjetin rajoissa ollut mahdollista. Samasta syystä päätettiin hankkia kannettava tietokone mittausdatan varastointiin ja analysointiin. Alkuperäisen budjetin rajoissa tämäkään ei olisi ollut mahdollista.

Kuivamädätyslaitteiston osat ja kustannukset on esitetty taulukossa 3. Tuotteet, joiden hinta on merkitty nollassi ovat ympäristötekniikan laboratoriosta, varastoista tai rakennuspajalta saatu hankkeen käyttöön.

Taulukko 3. Kuivamädätyslaitteiston osat ja hinta. (Hämäläinen, 2020.)

<b>Kuivamädätyslaitteiston osat</b>			
Tuote	Määrä	Yksikkö	Hinta (€)
<b>Reaktori</b>			
Kannellinen tynnyri (PE) 60l	1 kpl		0,00
Teräslevy	0,5 m2		0,00
Siiviläverkko nylon	0,5 m2		0,00
Sepeli	1 sk		0,00
Pesupussi (nylon) ja jätesäkit	3 kpl		9,15
Viemäriputki	0,5 m2		0,00
<b>Lämpökaappi</b>			
Pakastin	1 kpl		10,00
Kellokytkin	1 kpl		7,90
Palloventtiili	1 kpl		0,00
paineletkuliitäntä	1 kpl		0,00
Eristemassa	1 kpl		0,00
Lämminvesivaraaja/pumppu	1 kpl		0,00
<b>Perkolaatti</b>			
Kannellinen tynnyri (PE) 60l	1 kpl		0,00
Letkupumppu	1 kpl		0,00
Sekoitin	1 kpl		0,00
<b>Kaasunkeräys</b>			
Kaasunvirtausmittari (Ritter 0.5/1)	1 kpl		0,00
Biobasic kaasuanaysaattori (korjaus)	1 kpl		1434,18
Muovikanisteri 2l	1 kpl		0,00
<b>Instrumentit</b>			
Lämpötila-anturi PT100	2 kpl		60,00
Häkävaroitin	1 kpl		23,32
Metaanihälytin	1 kpl		380,43
Lämpötilamittauskortti	1 kpl		203,05
Digitalilähtökortti	1 kpl		0,00
Digitalilähtökortti	1 kpl		0,00
kannettava tietokone	1 kpl		832,00
<b>Putkisto</b>			
Läpivienti	3 kpl		20,70
Letkunkiristin	20 kpl		10,30
PVC-letku 12/18 mm	10 m		0,00
PVC-letku 12/18 mm	10 m		13,98
Palloventtiili 2 kpl, muhvi em. 4 kpl., T-yhde 2 kpl, palloventtiili, letkunippa, tulppa.	useita		59,48
Palloventtiili	1 kpl		0,00
Vesiputki (kupari)	5 m		0,00
<b>Sekalaiset</b>			
Suppilo ja vesiastia			43,38
Läpivientinippa+mutteri em 4 kpl, letkunippa em.	useita		64,42
Liitinnippa nito, liitinpesä nito, vesimittaritiiv. kumi kudoshah., kulmayhde em.	useita		14,97
Liitinnippa nito	3 kpl		15,84
Lavalukko ja vastapala	1 kpl		13,09
Vetoniittipihdit	1 kpl		19,95
<b>YHTEENSÄ</b>			<b>3236,14</b>

### 14.3 Ongelmat

Kuivamädätyslaitteistossa havaittiin testauksen ja koeajojen aikana muutamia ongelmia. Reaktorin perkolaatin poiston läpiviennin tiivistemassan huomattiin irronneen koeajon aikana. Tiivisteet joutuivat reaktorissa alttiiksi haastaville olosuhteille. Laitteiston tiivisteiden kuntoa on hyvä seurata.

Kaasumanometrin lukeman todettiin vähenevän perkolaatin kierrätyksen aikana. Ongelmaa pyrittiin korjaamaan lisäämällä kaasuletkuun manometriä ennen takaiskuventtiiliä, joka estäisi kaasun virtaamisen manometriltä reaktoriin päin. Takaiskuventtiiliä ei ollut kuitenkaan tarkoitettu tähän käyttöön. Sen todettiin toimivan huonosti, joten se poistettiin laitteistosta. Manometrin toimintaa seuraamalla todettiin sen muuttavan lukemaa vain noin litran verran perkolaattia pumpatessa. Manometri palautui näyttämään aiempaa lukemaa heti pumppauksen jälkeen. Ongelma ei aiheuttanut jatkotoimia, mutta ilmiötä on syytä seurata tulevilla kokeilla.

Vesikierron pumppu lakkasi toimimasta koeajossa. Tämä johtui liian vähäisestä veden määrästä vesikiertojärjestelmässä. Lämminvesivaraajasta haihtuvaa vettä pitää korvata lisäämällä sinne hanaa vettä. Tässä tapauksessa sinne oli unohtunut lisätä vettä. Laite oli ylikuumentunut ja ilmaa oli päässyt järjestelmään. Lämminvesivaraajan tarkkailuun on syytä kiinnittää huomiota tulevilla kokeilla. Toimenpiteistä lisää käyttöohjeet-osiossa.

Siivilöimätön ympäristö perkolaattinesteessä aiheutti tukkeutumisen perkolaattisäiliön imuletkussa. Tulevilla kokeilla on syytä kiinnittää huomiota perkolaatin koostumukseen. Tukkeutumisen varalta käyttöohjeissa on toimintaohjeet.

### 14.4 Laitteiston kehittäminen

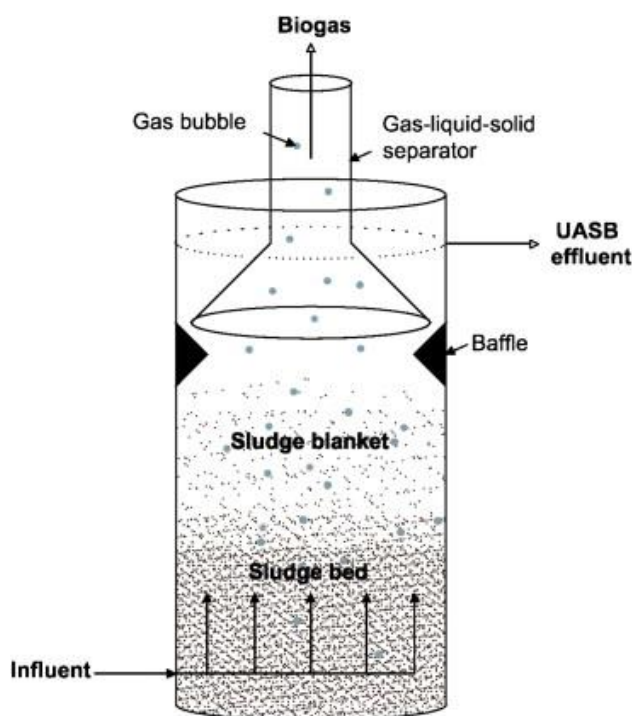
Kuivamädätyslaitteistoon on tarkoitus lisätä automaattinen mittausten keräys, tallennus ja analysointi. Tätä opinnäytetyötä kirjoitettaessa ei ollut mahdollista vielä lisätä näitä ominaisuuksia laitteistoon. Muutostyötä varten hankittiin kannettava tietokone, lämpötilamittauskortti sekä digitaalilähtökortit. Muutostyössä kaasumanometrin, biobasic-kaasuanalysaattorin sekä lämpötilanohjausyksikön mittauksien tiedot siirretään kannettavalle tietokoneelle. Mittauksien käsittelyyn ja analysointiin kaavailtua järjestelmää ei ole valittu.

Laitteistoon harkitaan reaktorin uusimista. Nykyinen reaktori korvataan mahdollisesti läpinäkyvästä muovista ja mittatilaustyönä rakennettavalla lieriön muotoisella säiliöllä. Uuden reaktorin avulla on helpompi seurata reaktoria, perkolaatin määrää ja kertymistä reaktorissa sekä säätää tarkemmin perkolaatin kierrätystä. Samankaltaisia säiliöitä on käytetty Savonian ympäristötekniikan hankkeissa.

Laitteistoa voitaisiin kehittää jakamalla biokaasuprosessi kahteen vaihteeseen. Tämä toteutettaisiin lisäämällä laitteistoon UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) eli täytekappalekolonnireaktori. Reaktori koostuu kolmesta osasta. Lietepedistä, lietepatjasta ja kaasu-neste-kiinteä-erottimesta. UASB-reaktori alustetaan syöttämällä laitteiston alaosasta mikrobisierroksena hapettomissa olosuhteissa

mädätettyä aktiivilietettä. Oikeissa olosuhteissa kevyet ja hajonneet partikkelit kulkeutuvat pois laitteistosta. Raskaat partikkelit jäävät laitteistoon ja muodostavat siellä rakeita tai flokkeja, jotka noin 2-8 kuukauden jälkeen muodostavat laitteiston pohjalle lietepedin ja sen yläpuolelle lietepatjan. Laitteiston ollessa käynnissä sen pohjalta syötetään käsiteltävää materiaalia (influent). Materiaali suotautuu lietepedin ja lietepatjan läpi. Suotautuessaan materiaalin orgaaninen aines hajoaa lietteen mikrobien vaikutuksesta metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Syntynyt kaasu ja kaasukupliin jäänyt liete nousee reaktorin yläosaan kaasu-neste-kiinteä-erottimelle, josta kaasu otetaan talteen ja neste poistetaan (effluent). (Ang, 2012, 4.)

Kuivamädätyslaitteistossa reaktorista poistuva perkolaattineste voidaan syöttää UASB-reaktoriin, josta sen sisältämä orgaaninen aines hajoaa biokaasuksi tehostaen laitteiston kaasuntuotantoa. Perkolaatti voidaan kierrättää UASB-reaktorista perkolaattisäiliöön, josta se pumpattaisiin takaisin kuivamädätysreaktoriin. UASB:n rakenne esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). (Ang, 2012, 4.)

## 15 KUIVAMÄDÄTYSLAITTEISTON OPTIMOINTI

### 15.1 Perkolaatin koostumus ja kierrätys

Biokaasutettavan massan kasteleminen perkolaattinesteellä on olennaista kuivamädätysreaktorissa, jossa ei ole sekoitusta. Tällainen reaktori on tässä työssä suunniteltu reaktori.

Perkolaattineste tuo biokaasutettavaan massaansa vettä, mikro-organismeja ja ravinteita sekä laimentaa anaerobisen hajoamisen välituotteiden kuten hajoavien rasvahappojen ja muiden toksisten aineiden pitoisuutta. Hajoamisen välituotteet voivat suurina pitoisuuksina inhiboida biokaasuprosessia

esimerkiksi laskemalla reaktorin pH:ta. Vesi on avainasemassa prosessin toimivuudessa. Se toimii liuottimena ja mikrobien ja ravinteiden kuljettimena ja levittäjänä. Perkolaatin koostumus ja sen kierrätys ovat erittäin tärkeitä kuivamädätyslaitteiston tasaisen ylläpidon kannalta. (Shewani, 2015, 3.)

Kuivamädätyslaitteiston ensimmäisessä koeajossa käytettiin perkolaattina veden ja biokaasupanoskokeiden mädätysjäännöksen sekoitusta. Toisessa koeajossa käytettiin ymppinä ensimmäisen koeajon reaktorin mädätysjäännöstä. Perkolaattinesteen osittaista vaihtamista hanavedellä suoritettiin koeajoissa, koska sen oli kirjallisuudessa todettu edistävän haihtuvien rasvahappojen liukenemista ja estävän prosessin happamoitumista. (jagadabhi, 2019, 4-6.)

Toisessa koeajossa päätettiin lisätä Maanigan biokaasulaitoksen mädätysjäännöstä perkolaattinesteeseen, kun laitteiston metaanintuotannon todettiin hiipuvan. Hiipumisen arveltiin johtuvan perkolaattinesteen alhaisesta vs-pitoisuudesta, mikä todennäköisesti johtui ympin kiintoaineen suotautumisesta biokaasutettavaan massaansa ensimmäisessä koeajossa. Toimenpide kiihdytti metaanin tuotantoa, mutta vain hetkellisesti. Toisen koeajon tuoton todettiin kuitenkin olleen vain hieman koeajo 1 alhaisempi suhteutettuna orgaanisen aineen osuuteen.

Kolmannessa koeajossa lisättiin perkolaattinesteeseen siivilöimätöntä Maanigan biokaasulaitoksen mädätysjäännöstä. Siivilöimätön mädätysjäännös aiheutti kuitenkin tukoksen letkupumppuun, joten perkolaattineste päätettiin siivilöidä. Koeajon 3 tuotto oli orgaanisen aineksen osuuteen suhteutettuna suurin verrattuna aiempiin koeajoihin.

Ympin lisääminen perkolaattinesteeseen ennen uuden ajon aloitusta on suositeltavaa ainakin biokaasutettaessa ainoastaan säilörehua, mutta myös siinä tilanteessa, että perkolaatin orgaanisen aineen osuus on matala. Perkolaatin koostumuksen vaikutusta voitaisiin myös testata tulevissa kokeissa siten, että ymppiä lisättäisiin suoraan massaansa ja perkolaattineste vaihdettaisiin hanaveteen. Toinen koe voitaisiin toteuttaa lisäämällä ymppi suoraan massaansa ja täyttämällä reaktorin hanavedellä. Reaktorista neste suotautuisi tyhjiin perkolaattisäiliöön. Tällainen järjestely on ollut laboratoriomittakaavan kokeessa (Lehtomäki, 2006, 59).

Perkolaattia kierrätettiin ensimmäisessä koeajossa aluksi 15 minuuttia, neljä kertaa vuorokaudessa perkolaattipumppun pyörimisnopeuden ollessa 180 rpm. Yhden viidentoista minuutin ajanjaksolla perkolaattia kierrätettiin reilut 30 l. Tämän todettiin aiheuttavan perkolaattinesteen kerääntymistä reaktoriin ja kuivamädätysolosuhteiden muuttumista. Toisessa koeajossa päätettiin letkupumpun kierrätysnopeutta laskea sataan kierrokseen minuutissa ja lyhentää pumppausaikaa viiteen minuuttiin. Kaasuntuotanto ei kuitenkaan lähtenyt nousuun, joten pumppausaikaa päätettiin venyttää kymmeneen minuuttiin. Tällöinen yhdellä pumppauksella perkolaattia kiersi noin 13 l. Kolmannessa koeajossa kierrätettiin perkolaattia kolme kertaa vuorokaudessa 15 minuuttia kerrallaan. Tämän todettiin olevan toimiva ratkaisu. Perkolaattia ei kertynyt ylimäärin reaktoriin.

Perkolaatinkierrätyksessä on säädettävää. Säädön tarve riippuu varmasti myös biokaasutettavien materiaalien ominaisuuksista, joten tarkkaa kaikissa tilanteissa toimivaa menetelmää on vaikea antaa. Perkolaattinesteen kierrätys letkupumpun asetuksella 100 rpm, pumppausaika 10 minuuttia ja pumppauskerrat kolme kertaa vuorokaudessa ovat kuitenkin hyvä lähtötilanne, josta säätöjä voidaan alkaa muuttaa. On tärkeä pitää kierrätys riittävällä tasolla, jotta biokaasutettava massa ei pääse kuivamaan, mutta ei myöskään kastumaan liian märäksi. Koeajoissa havaittiin, että suurempi perkolaatin kierrätys on eduksi ajon alussa biokaasuprosessin käynnistymiselle. Perkolaatinkierrätyksen vähentäminen loppuvaiheessa estää perkolaatin kerääntymisen reaktoriin. Tämä huomattiin säilörehun kohdalla. Hajotessaan säilörehu muodosti reaktoriin tiiviin kerroksen, joka ajon loppuvaiheessa hidasti perkolaatin suodattumisesta.

## 15.2 PH:n säätö

Anaerobisen biokaasuprosessin optimaalinen pH alue on 6,8-7,2. Metanogeenisten bakteereiden kasvu hidastuu merkittävästi, jos pH on alle 6,6. Liian emäksinen tila voi johtaa prosessin kaatumiseen. Vaikka metanogeneesiin optimi pH on noin 7, hydrolyysin optimi pH on raportoitu olevan välillä 5,5-6,5. Tämä on yksi syy siihen miksi joissain biokaasulaitteistoissa metanogeneesi ja asetogeneesi on erotettu kahteen eri prosessiin. Kuivämädätyslaitteistoa voitaisiin myös muokata tämän suuntaiseksi sisällyttämällä siihen UASB. (Ward, 2008, 4.)

Biokaasuprosessin alkuvaiheessa muodostuu hajoavien yhdisteiden hajotessa haihtuvia rasvahappoja, jotka laskevat prosessin pH:ta. Haihtuvat rasvahapot hajoavat edelleen prosessin edetessä nostaen pH:ta. Prosessin äkillistä pH:n vaihtelua pyritään estämään parantamalla prosessin puskurointikykyä eli alkaalisuutta. Alkaalisuus anaerobisessa prosessissa on hiilidioksidin ja bikarbonaatti-ionien tasapaino, joka pyrkii vastustamaan pH:n äkkinäisiä vaihteluja. Puskurointikyky on suoraan verrannollinen bikarbonaatti-ioni-konsentraatioon. (Ward, 2008, 4.)

Koeajoissa biokaasutettiin säilörehua, jonka pH oli hieman yli 4. Ensimmäisessä koeajossa käytettiin kalsiumbikarbonaattia puskurointiaineena. Sitä lisättiin ensimmäisessä koeajossa liian vähän, mikä johti perkolaattinesteen pH:n laskuun. Kalsiumbikarbonaattia jouduttiin lisäämään pH:n nostamiseksi. Ensimmäisessä koeajossa kalsiumbikarbonaattia lisättiin yhteensä 200 g eli 3 g /100 g biokaasutettavaa materiaalia. Ph:n lasku saatiin pysäytettyä ja metaanintuotto nousi. Natriumbikarbonaatin määrä osoittautui sopivaksi ja sitä lisättiin seuraavissa koeajoissa 200 g. Kyseinen määrä sopi säilörehulle tehtäviin biokaasukokeisiin. Testattaessa muita tutkittavia materiaalia on natriumbikarbonaatin määrää jouduttava todennäköisesti muuttamaan. Avainasemassa pH:n säädössä on perkolaatin alkaaliteetin seuranta. Alkaaliteetin seuranta on luotettavampi prosessin tasapainon mittari kuin pH (Ward, 2008, 4).

### 15.3 Lämpötila

Kuivamädätyslaitteiston lämpötilan tavoitearvo oli 38°C kaikissa koeajoissa. Lämmitysjärjestelmä toimi hyvin ja ylläpiti kohdelämpötilaa erinomaisesti. 35-37 celsius-asteen mesofiilinen lämpötila on tyypillistä Suomessa toimiville biokaasulaitoksille (Latvala, 2009, 34). Muutaman asteen muutokset on havaittu vaikuttavan biokaasuntuotantoon (Ward, 2008, 3-4). Kuivamädätyslaitteistoa voitaisiin säätää myös tuolle alueelle kaasuntuotannon optimin selvittämiseksi.

Perkolaatin syöttäminen imee laitteiston ulkopuolisista kaasuletkuista laitteistotilan lämpöistä kaasua. Myös perkolaatin lämpötila on hieman reaktoria alhaisempi. Näistä syistä perkolaatin pumppaus aiheuttaa lämpötilan laskua reaktorissa. Koeajoissa lämpötila saattoi pudota lähelle kolmeakymmentä celsius-astetta pumppauksen aikana. Tällä saattaa olla vaikutusta kaasun tuotantoon. Pumppauksen keston pituutta voisi vaihdella lämpötilan muutoksen minimoimiseksi ja kaasuntuoton parantamiseksi. Laitteistoon on mahdollista lisätä sähköisesti ohjattu venttiili, joka sulkeutuisi pumppauksen ajaksi estäen kaasun imemisen letkuista.

### 15.4 Esikäsittely

Biokaasutettaessa peltobiomassoja kuten säilörehua voidaan syötteen esikättelyllä lisätä biokaasuntuotantoa, haihtuvien rasvahappojen reduktiota ja parantaa liukenemista. Esikäsittelyt sopivat erityisen hyvin peltobiomassojen biokaasukäsittelylle, koska ne sisältävät suuren määrän selluloosaa ja ligniiniä. fysikaalisilla tai kemiallisella esikäsittelyllä tai kuumentamalla voidaan pilkkoa näitä vaikeasti hajoavia polymeerejä. Lisäaineet voivat tehostaa kaasuntuottoa tai nopeuttaa prosessin käynnistymistä. Emäskäsittelyllä on tutkimuksissa saatu tehostettua metaanintuotantoa ja selluloosan reduktiota. Lämmityskäsittelyllä on myös tutkimuksissa parannettu metaanintuotantoa. Yhdistetty lämpö- ja kemiallinen käsittely pienentää partikkelikokoa ja liukoisuutta. (Ward, 2008, 6.)

Partikkelikoko voi vaikuttaa anaerobisen mädätyksen nopeuteen sillä se vaikuttaa suoraan materiaalin määrään, jota hydrosoivilla entsyymeillä on saatavilla. Tämä pitää paikkansa eteenkin kasvukuitujen osalta. Kuitujen hajoaminen ja metaanintuotanto lisääntyy pienentämällä partikkelikokoa sadasta millimetristä kahteen millimetriin. (Ward, 2008, 7.)

Metallien lisääminen syötemateriaaliin on todettu lisäävän biokaasuntuotantoa. Tutkimuksessa on todettu, että propionaatin tehokas poistaminen korkeassa haihtuvien rasvahappojen pitoisuudessa tarvitsee lisäksi kalsiumia, rautaa ja nikkeliä ja hiilimonoksidia termofiilisessä sekoitusreaktorissa. Lehmän lannan ja perunankuorintajätteen anaerobinen mädätys tehostui lisäämällä raskasmetalleja. Myös mikrobipopulaatiota sisältävän pötsinesteen lisääminen on parantanut haihtuvien rasvahappojen tuotantoa lignoselluloosaa sisältävillä materiaaleilla. (Ward, 2008, 7.)

## 16 KÄYTTÖOHJEET

### 16.1 Turvallisuus

Kuivamädätyslaitteisto tuotti parhaimmillaan yli 100 litraa biokaasua päivässä. Kaasun päätyminen laitteistotilaan voi aiheuttaa välittömän hengenvaaran. Myös laitteiston huoltaminen, mittausten tekeminen tai säätäminen voivat aiheuttaa, kaasun vapautuessa laitteistosta, välittömän hengenvaaran. Kuivamädätyslaitteistossa käsiteltävät materiaalit voivat silmiin tai suuhun joutuessaan aiheuttaa vakavan terveysvaaran. On välttämätöntä, että turvallisuusohjeita noudatetaan. Turvallisuusohjeet löytyvät liitteestä 4.

### 16.2 Perkolaattisäiliön panostus

- Perkolaattisäiliö täytetään perkolaattineesteellä. Maksimi täyttömäärä on 40 l.
- Varmistetaan, että säiliön kannen letkuissa ei ole tukkeumia.
- Perkolaattisäiliön kannen imuletku työnnetään säiliöön ja kansi kierretään kiinni.
- Varmistetaan, että näytteenottoaukon korkki on kiinni.
- Perkolaattisäiliö nostetaan kahvoista laitteiston alahyllylle niin, että korkki jää osoittamaan ulospäin ja vinosti vasemmalle.
- Varmistetaan, että laitteiston alaosan ovi menee kunnolla kiinni.
- Perkolaattisäiliön kannen letkujen pikaliittimet kiinnitetään vastakappaleisiin.

### 16.3 Reaktorin panostus

- Ennen reaktorin panostusta tarkistetaan että, reaktorin kannen läpiviennit ja letkut sekä perkolaatin poistoputki ja sen läpivienti ovat kunnossa.
- Kaadetaan vettä reaktoriin. Jos vesi poistuu reaktorin pohjan perkolaattiletkusta ja letkun läpivienti ei vuoda, voidaan siirtyä reaktorin panostamiseen. Mikäli näin ei ole siirrytään laitteiston huoltoon.
- Reaktorin pohjalle asetetaan 3 pyöreää korotusrengasta.
- Palojen päälle asetetaan metallisiivilä. Metallisiivilä ei saa sellaisenaan mahtumaan reaktoriin, vaan sitä on hieman taivutettava. Taivuttamisessa kannattaa käyttää suojahanskoja, koska siivilän reunat ovat terävät.
- Siivilän päälle asetetaan sepelipussi. Sepeli levitetään tasaisesti siivilän päälle.
- Siivilän päälle asetetaan biokaasutettava materiaali. Materiaalin mukaan voidaan käyttää pesupussia panoksen ympärillä. Varmistetaan, että materiaalia ei ole reaktorin kanteen asti, jotta syötettävä perkolaatti pääsee leviämään eripuolille reaktoria.
- Reaktori nostetaan paikalleen laitteiston ylemmälle hyllylle siten, että perkolaatin poistoputken pää syötetään hyllyn takareunan reiästä läpi hyllyn alapuolelle. Reaktori asetetaan paikalleen niin, että perkolaatin poistoputken läpivienti on hyllyn takaseinän reiän kohdalla ja reaktori asettuu hyvin paikoilleen.
- Perkolaatin poistoputki kierrätetään vastapäivään ylemmän hyllyn alapuolella ja putkenpään liitin kiinnitetään perkolaattisäiliön kannen vastakappaleeseen.



- Reaktorin kansi asetetaan reaktorin yläpuolelle. Reaktorin kannen harmaa lämpötila-anturin liitin kierretään auki ja laitteiston takaseinällä roikkuva lämpöanturin johto syötetään harmaan liitännän kautta kannen läpi, niin että anturin johto ylettää biokaasutettavaan massa-  
saan. Anturin liitin kierretään kiinni ja anturin pää työnnetään massan sisälle.
- Reaktorin kansi suljetaan ja kiristetään pannalla.
- Reaktorin kannen letkujen pikaliittimet liitetään niiden vastakappaleisiin.
- Laitteiston ovet suljetetaan ja säpit kiinnitetään.
- Varmistetaan, että laitteiston päällisen tuuletusputken venttiili ja laitteiston alaosan paineilmaletkun liitin ovat kiinni.

#### 16.4 Kaasunkeräys

- Tarkistetaan kaasumanometrin kaasukuplasta, että laite on suorassa. Jos laite ei ole suorassa, säädetään se suoraksi jalkojen korkeutta säätämällä.
- Tarkistetaan, että kaasumanometrissä on tarpeeksi vettä. Tämä toteutetaan kiertämällä tarkastusputken venttiili auki manometrin takaa. Jos putken päähän muodostuu vesikupla, manometrissä on tarpeeksi vettä. Jos vesikuplaa ei muodostu, pitää laitteeseen lisätä vettä.
- Vettä lisätään avaamalla manometrin takaa syöttöputken tulppa lenkkiavaimella. Takaventtiilin ollessa auki, syöttöputkeen lisätään hanavettä, kunnes vettä tulee ulos tarkastusputkesta. Syöttöputken tulppa kierretään takaisin kiinni ja venttiili suljetaan.
- Kaasupussi kiinnitetään laitteiston kaasupussille tarkoitettuun letkuun ja ripustetaan sille varattuun koukkuun. Letkun pää kiristetään letkukiinnikkeellä tiukasti kaasupussin hanaan. Kaasupussin hana aukaistaan.
- Tarkistetaan, että vesilukossa on riittävästi vettä ja se on pystyasennossa, vesilukolle tuleva letku ylettyy sen pohjalle, vesilukolta lähtevä letku on kiinni sen kannessa, mutta ei kosketa veden pintaa ja vesilukon korkin tiivistysteippi on paikoillaan.
- Biobasic-kaasuanalysaattori kytketään päälle laitteen sivuseinän kytkimestä. Ohjauspaneelista säädetään kaasun analysoinnille mittausintervalli. Ohjeet kaasuanalysaattorin säätöön löytyvät analysaattorin ohjekirjasta. Varmistetaan, että sininen raikkaan ilman tuloletku on kiinni kaasuanalysaattorissa.
- kaasulinjan venttiilit aukaistaan. Varmistetaan, että vesilukolta lähtevän letkun pää ja laitteiston päältä lähtevän tuuletusletkun pää ovat kiinni tuuletuskanavan ristikossa.

#### 16.5 Perkolaatin kierrätys

- Kellokytkimelle asetetaan ajanjaksot, jolloin letkupumppu on päällä ja kierrättää perkolaattia reaktoriin. Kellokytkimen asetusten muuttamiseen seurataan kellokytkimen ohjekirjaa. Letkupumpun säätämiseen seurataan letkupumpun ohjekirjaa.
- Letkupumpun asetuksista varmistetaan, että AUTO START on päällä.
- Letkupumpun näytöstä asetetaan kierrosnopeus (rpm/min) syötölle. Tehtyjen kokeiden perusteella 100 kierrosta minuutissa syötti perkolaattia noin 1,25 l/min.

- Varmistetaan, että letkupumppu kierrättää perkolaattia. Jos perkolaatti ei kierrä, letkujärjestelmässä voi olla tukos. Tukosta voidaan yrittää aukaista vaihtamalla letkupumpun pump-pauksen suuntaa painamalla kierrossuunnan painiketta letkupumpusta. Jos toimenpide ei aukaise tukosta, tulee perkolaattiletkuista tarkistaa missä tukos on sekä irrottaa tukkoinen letku ja puhdistaa se. Todennäköisin tukkeutumiskohta on perkolaattisäiliön imuletku.

## 16.6 Lämmönsäätö

- Ennen kuin lämpöjärjestelmää kytketään päälle, täytetään lämminvesivaraajan vesisäiliö lämpimällä hanavedellä.
- Lämminvesivaraajan lämpötilansäädin kierretään maksimi asentoon.
- Pumpun pumppausnopeus säädetään maksimiasentoon.
- Lämpötilan ohjausyksikkö kytketään päälle laittamalla sen virtajohto virtapistokkeeseen.
- Lämmönohjausyksikön ohjaustaulusta säädetään reaktorin lämpötila. Ohjeet lämpötilan muuttamiseen löytyvät lämpötilan ohjausyksikön ohjeista.
- Lämminvesivaraajan virtajohto liitetään virtapistokkeeseen.
- Varmistetaan, että vesi kiertää lämmitysputkistossa.

## 16.7 Mittausaukon käyttö

Aloitettaessa mittausaukon käyttö laitteisto huuhdellaan, kaasuletkujen venttiilit suljetaan ja varmistetaan, että perkolaatin kierrätys ei ole päällä tai kytkeydy päälle toimenpiteen aikana. Perkolaattisäiliön mittausaukon kansi kierretään auki. Perkolaattinestettä sekoitetaan hyvin mittausaukosta sekoittajalla.

- PH:n mittauksessa pH-anturi lasketaan aukosta perkolaattinesteeseen mittausta varten. PH:n arvon tasaantuessa otetaan lukema, jonka jälkeen anturi poistetaan säiliöstä ja pestään. Ohjeet pH:n anturin käytöstä löytyvät sen ohjekirjasta.
- Näytettä otettaessa pipetoidaan sekoitettua perkolaattinestettä aukon kautta.
- Otettaessa perkolaattinestettä suurempia määriä esimerkiksi perkolaattinesteen vaihdon yhteydessä, perkolaattisäiliötä voidaan vetää ulos laitteistosta ja kallistaa, jotta nestettä voidaan valuuttaa astiaan. Mikäli toimenpide ei onnistu voidaan säiliö irrottaa letkuliittimistä ja ottaa laitteistosta ulos kaadon helpottamiseksi. Tässä tapauksessa on syytä huomioida, että reaktorista tulevasta perkolaatinpoistoletkusta saattaa valua nestettä. Letkun pää on syytä asettaa astiaan, jotta neste ei valu laitteiston sisälle.

## 16.8 Seuranta

Laitteistoa joudutaan seuramaan lähes päivittäin, jotta prosessia voidaan pitää yllä. Laitteistossa on useita asioita, jotka vaativat huomiota. Tällaisia ovat seuraavat asiat.

- Kiertovesivaraajaan on lisättävä vettä. Vesikiertojärjestelmä ei ole suljettu, joten vettä haihtuu lämmitysjärjestelmästä.
- Lämmitysjärjestelmän toimivuutta on seurattava. Kiertovesipumpun ja veden lämmityksen toiminta on varmistettava.

- Kaasumanometrin veden määrä on tarkistettava. Tämä tapahtuu manometrin tarkistusputkesta.
- Kaasumanometrin toimintaa on seurattava perkolaattipumppauksen aikana. Perkolaatin kiertäys aiheuttaa todennäköisesti alipaineen kaasuletkuissa ja manometrin osoitin alkaa kulkea taaksepäin. Ilmiö havaittiin koeajoissa, mutta sen todettiin palauttavan manometrin lukemaa taaksepäin vain noin litran verran, jonka jälkeen lukema palasi ennalleen. Tätä on syytä seurata siltä varalta, että ilmiö pahenee.
- Perkolaatin kierrätyksen toimivuutta on seurattava. Perkolaattineste saattaa aiheuttaa letkujen tukkeutumista.
- Perkolaatin valuminen reaktorista perkolaattisäiliöön voidaan varmistaa kuuntelemalla perkolaattisäiliötä.
- Letkupumpun letkun paikkaa ja kuntoa on seurattava, jottei letku joudu alttiiksi hajoamiselle.
- Kaasupussin täyttymistä on seurattava. Kaasupussissa on aina oltava riittävästi kaasua, jotta kaasuanalysaattori voi toimia normaalisti. Mikäli kaasua ei muodostu tarpeeksi kaasuanalysaattorin mittauksia varten, pitää kaasuanalysaattorin mittausväliä harventaa.
- Kaasuletkut on tarkistettava kondenssiveden ja tukkeutumien varalta.
- Vesilukko on tarkistettava. Vesilukossa on oltava riittävästi vettä. Toinen letkuista pitää olla säiliön pohjalla ja toisen nestepinnan yläpuolella. Kannen tiivisteet on oltava ehjiä.

## 16.9 Laitteiston huolto

- Huolto tehdään jokaisen biokaasukokeen jälkeen.
- Reaktori tyhjennetään ja pestään.
- Biokaasupanoksen ympärillä käytetty pesupussi pestään.
- Korotuspalat ja metallisiivilä pestään.
- Sepeli huuhdellaan lämpimällä vedellä pesupussissa.
- Jos reaktorin pohjan perkolaattiliitäntä vuotaa, vanha tiivistemassa irrotetaan, liitoskohta hiotaan ja liitos kiristetään ja tiivistetään uudella tiivistemassalla.
- Tarkistetaan reaktorin kannen läpivientien kunto ja tarvittaessa uusitaan tiivistemassa.
- Laitteiston letkut tarkistetaan. Letkuihin, joihin on kerääntynyt likaa, irrotetaan liitoksistaan ruuvaamalla letkuliittimet ruuvimeisselillä auki ja vetämällä ne liittimistä. Likaiset letkut pestään.
- Perkolaattisäiliön kansi irrotetaan ja siihen kiinnitetyt letkut pestään.
- Kannen läpiviennit tarkistetaan ja tarvittaessa tiivistemassa uusitaan.
- Perkolaattisäiliö tyhjennetään ja pestään tarvittaessa.
- Laitteiston läpiviennit tarkistetaan ja tiivistetään mikäli tiivistemassa on irronnut.
- Kaasupussi tyhjennetään ja tarkistetaan sen kaasutiiveys.
- Laitteiston vikatilanteisiin löytyy liitteestä 3 toimenpidetaulukko.

## 17 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin liikuteltavan pilot-kokoluokan kuivämädätyslaitteiston suunnitteluun ja rakentamiseen. Suunnittelutyön lähtötietoja hankittiin tutustumalla biokaasuprosessiin, eri reaktoryyppeihin, tehtyihin biokaasukokeisiin sekä vierailemalla toiminnassa olevilla laitoksilla. Laitteistosuunnitteluun edettiin piirtämällä laitteiston havainnekuvat, joiden pohjalta päätettiin mihin suuntaan suunnittelua halutaan jatkaa. Suurin haaste suunnittelussa oli laitteiston rakentamiseen varattu niukka budjetti, joka edellytti luovia ratkaisuja suunnittelussa. Suunnittelussa onnistuttiin löytämään laitteiston toteutukselle ratkaisut. Kierrätysmateriaaleja- ja laitteita sekä ympäristötekniikan hankkeiden tarvikkeita hyödyntäen voitiin suunnitella toteutettavissa oleva laitteisto. Suunnitelmaan voitiin suunnittelutyön edetessä liittää parannuksia. Kaasunmittauksen parantamisen ja mitaustiedon jatkuvatoimisen tallentamisen sisällyttäminen suunnitelmaan paransi laitteiston hyödyntämistä.

Käytöstä poistetusta pakastimesta rakennettiin kuivämädätyslaitteisto Savonia-ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan työpajalla. Laite onnistuttiin saamaan tutkimuskäyttöön ympäristötekniikan jätevesilaboratorion kylmiöön, missä se oli lähellä laitteiston muutos- ja korjaustöihin tarvittavia resursseja. Laitteiston toimivuutta testattiin ja sille tehtiin säilörehun kuivämädätyskokeita. Testauksessa ja kuivämädätyskokeissa laitteiston toiminnassa havaittujen puutteiden perusteella laitteistoa muokattiin toimivammaksi. Laitteiston tulevaa käyttöä varten opinnäytetyöhön tehtiin kuivämädätyslaitteiston käyttöön ohjeistus ja turvallisuusohjeet.

Kuivämädätyslaitteiston käytön aikana ilmeni ongelmia, mutta ne saatiin korjattua. Käytöstä johtuvaa kulumista on seurattu ja tämän tiedon perusteella on laadittu korjaustoimenpiteet. Laitteisto on ensimmäisestä koeajosta lähtien tuottanut hyvin metaania ja sen järjestelmät ovat onnistuneesti pitäneet biokaasuprosessin käynnissä. Laitteistolla on onnistuneesti biokaasutettu erilaisia biomassoja ja laitteiston mädätysjäännöistä on voitu toimittaa hyönteisten kasvatuskokeisiin Insect Savo – hankkeen tavoitteiden mukaisesti.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

ALUEHALLINTOVIRASTO (AVI) 2016. Ympäristölupa. Kymeenlaakson jäte oy. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavilla: <https://tietopalvelu.ahelp.fi/Lupa/>

ANG, H., CHONG, S., KAYAALP, A. ja SEN, T. 2012. The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment – A State-of-the-art review. WaterResearch 46:2012. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412002400>

BIO-GTS OY, 2018. Bioboksi. Lähienergiaa liikennekäyttöön. Power-point-esitys. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavilla: <https://www.kaasuyhdistys.fi/wp-content/uploads/2018/12/Bioboksi-Annimari-Lehtomaki.pdf>

EARTHLEE, 2018. [verkkosivusto]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: <https://www.earthlee.com/dry-digestion>

FU, Y., LUO, T., MEI, Z., LI, J., QIU, K. and GE, Y. 2018. Dry anaerobic digestion technologies for agricultural straw and acceptability in China. Sustainability 2018/10. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/12/4588>

HUIKURI, Niina 2014-10-24. Uutta, kustannustehokkaampaa biokaasutusta maatiloille! [verkkoi-  
neisto]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: [http://bioenergia.pikes.fi/etusivu?p\\_p\\_id=33&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=5&p\\_r\\_p\\_564233524\\_tag=biokaasutus](http://bioenergia.pikes.fi/etusivu?p_p_id=33&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=5&p_r_p_564233524_tag=biokaasutus)

HÄMÄLÄINEN, Juha 2020. [Digitaaliset kuvat]. Sijainti: Juha Hämäläisen sähköiset kokoelmat

HÄMÄLÄINEN, Juha 2020. [CAD-piirustukset]. Sijainti: Juha Hämäläisen sähköiset kokoelmat

JAGADABHI, Padma, KAPARAJU, Prasad ja RINTALA, Jukka, 2009. Effects of micro-aeration and leachate replacement on COD solubilization and VFA production during mono-digestion of grass-silage in one state leach-bed reactors. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409014904>

KYMÄLÄINEN, Maritta ja PAKARINEN, Outi 2015. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeen ammattikorkeakoulu. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK\\_Biokaasun\\_tuotanto\\_2015\\_ekirja.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

LATVALA, Markus 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristö 24. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY\\_24\\_2009.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1)

LEHTOMÄKI, Annimari 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylän yliopisto. Ympäristötieteen laitos. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MOTIVA OY 2013. Biokaasuntuotanto maatilalla. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun\\_tuotanto\\_maatilalla.pdf](https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf)

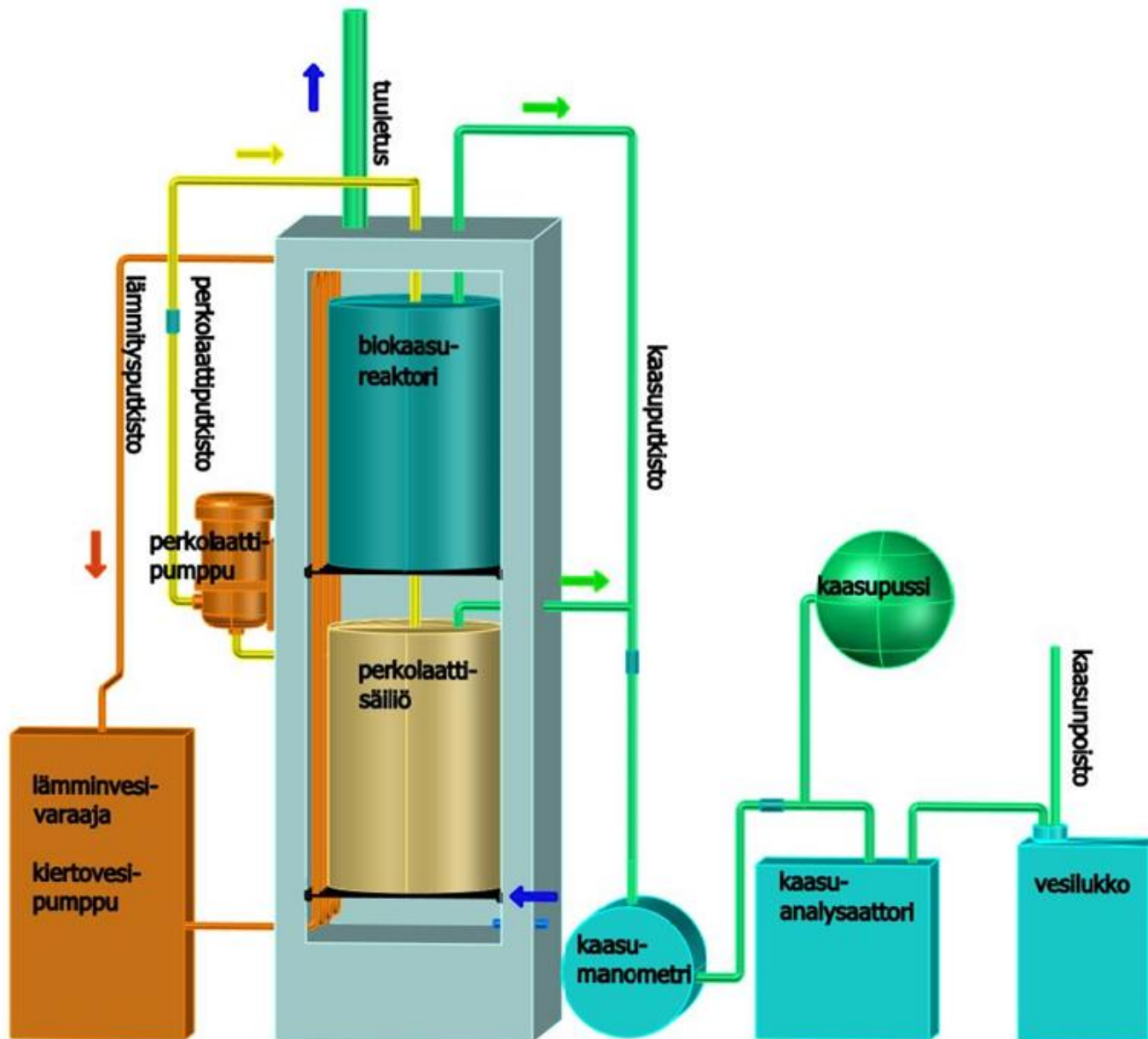
PAUKKONEN, Jani 2019. [Digitaaliset kuvat]. Sijainti: Kuopio: Jani paukkosen sähköiset kokoelmat.

PULKKINEN, Iida 2019. [Digitaaliset kuvat]. Sijainti: Kuopio: Iida Pulkkisen sähköiset kokoelmat.

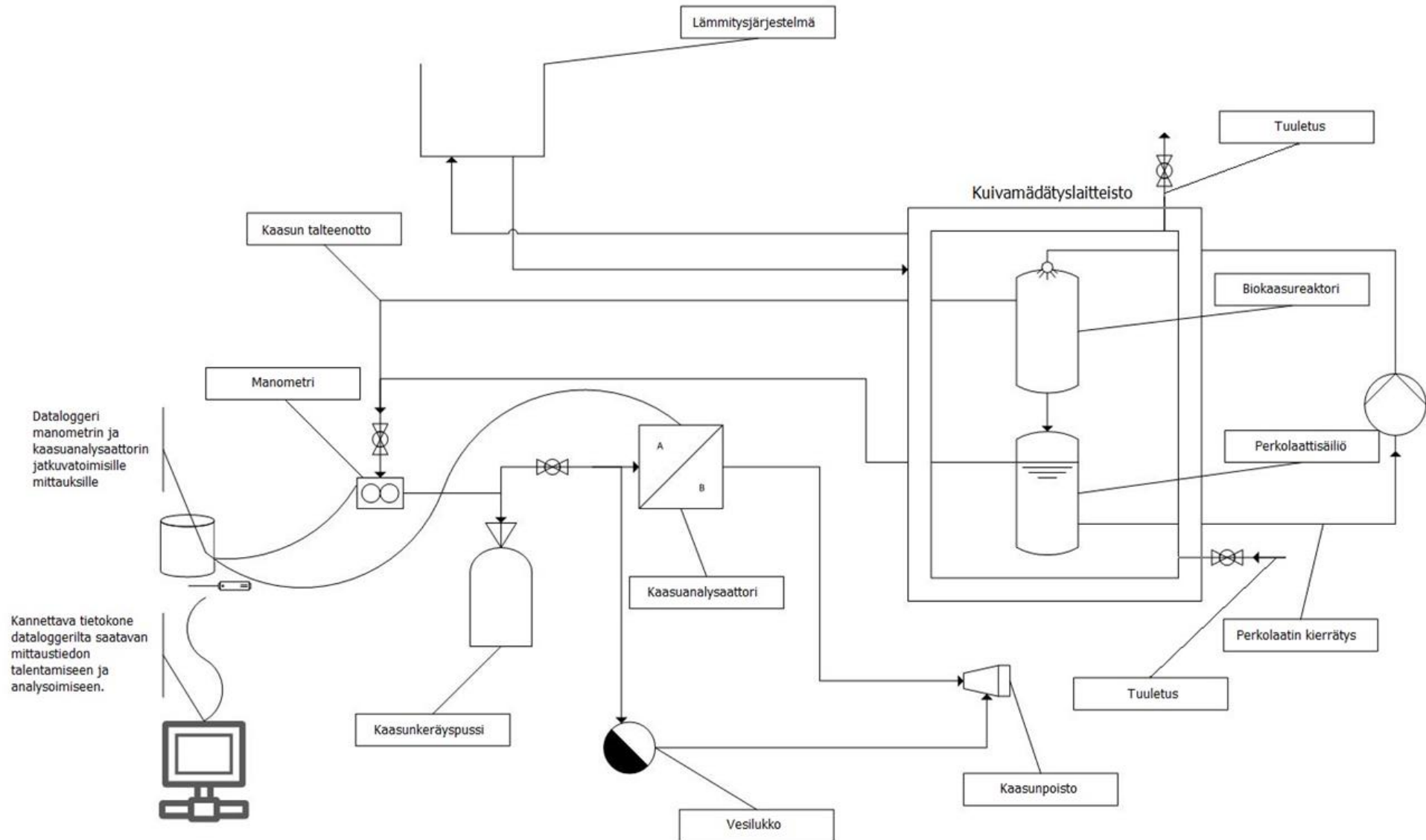
SHEWANI A., HORGUE P., POMMIER S., DEBENEST G., LEFEBVRE X. 2015. Assessment of percolation through a solid leach bed in dry batch anaerobic digestion processes – Bioresource Technology. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavilla: [https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01131165/file/Shewani\\_13612.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01131165/file/Shewani_13612.pdf)

WARD, A., HOBBS, P., HOLLIMAN, P. ja JONES D. 2008. Optimisation of anaerobic digestion of agricultural resources – Bioresource Technology. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 2020-04-01.] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408001880>

## LIITE 1: RAKENNETUN LAITTEISTON AUTOCAD-PIIRROS



## LIITE 2: KUIVAMÄDÄTYSLAITTEISTON PROSESSIKAAVIO





## LIITE 3: VIANMÄÄRITYSTÄULUKKO

Ongelma	Syy	Toimenpide
Perkolaatti ei kierrä järjestelmässä.	Imuletku tukossa.	Vaihdetaan letkupumpun pumppaussuuntaa. Jos tukos ei poistu, keskeytetään perkolaatin pumppaus huoltotoimenpiteen ajaksi. Huuhdellaan laitteisto ilmalla. Perkolaattisäiliö poistetaan laitteistosta. Kansi ja sen letkut huuhdellaan vedellä.
	Tukos perkolaattiletkussa säiliön ja reaktorin välissä.	Keskeytetään perkolaatin pumppaus huoltotoimenpiteen ajaksi. Irroitetaan tukkeutunut letkun osa liittimistä ja huuhdellaan vedellä.
	Tukos reaktorin kannen perkolaattiletkussa.	Keskeytetään perkolaatin pumppaus huoltotoimenpiteen ajaksi. Huuhdellaan laitteisto ilmalla. Reaktori poistetaan laitteistosta. Kansi ja sen letkut huuhdellaan vedellä.
	Letkupumpun letku ei ole kunnolla kiinni.	Keskeytetään perkolaatin pumppaus huoltotoimenpiteen ajaksi. Irroitetaan letku pidikkeestä ja asetetaan uudelleen paikalleen. Tarvittaessa kiristetään kiinnitystä.
Kaasua ei kerry kaasupussiin.	Venttiili/venttiilit on/ovat kiinni.	Aukaistaan venttiili/venttiilit.
	Kondensiovetä kaasuletkuissa.	Suljetaan venttiilit toimenpiteen ajaksi. Irroitetaan tukkeutuneen letku osan toinen pää liittimestä ja valutetaan neste pois letkusta.
Perkolaattisäiliön pinta laskee.	Tukos reaktorin perkolaatinpoistoletkussa.	Huuhdellaan laitteisto puhtaalla ilmalla. Irroitetaan letkun pää perkolaattisäiliöstä ja asetetaan astiaan. Huuhdellaan letkua vedellä. Jos ei toimenpide tehoa. Nostetaan reaktori pois laitteistosta. Irroitetaan perkolaatinpoistoletku reaktorin liittimestä ja huuhdellaan se. Puhdistetaan poistoletkun liitin ja läpivienti.
	Tukos reaktorin alatilassa.	Huuhdellaan laitteisto puhtaalla ilmalla. Poistetaan reaktori laitteistosta. Avataan reaktori ja tyhjennetään se. Poistetaan pohjalle kertynyt tukos.
	Perkolaatin syöttö on liian nopeaa.	Perkolaattia ei ehdi postua reaktorista yhtä nopeasti kuin sitä sinne kertyy. Vähännetään perkolaatin syöttöä. (syöttökertoja tai kertojen pituutta)
Lämmitysjärjestelmä ei lämmitä laitteistoa.	Vesi on loppunut lämminvesivaraajan säiliöstä.	Lisätään vettä säiliöön.
	Lämminvesivaraajan termostaatti ei ole oikeassa asennossa.	Säädetään termostaatti maksimiasentoon.
	Pumppu ei kierrätä vettä.	Irroitetaan pumpun virtajohto hetkeksi. Jos toimenpide ei tehoa, irroitetaan pumpun pesä ja puhdistetaan se.
Biobasic ei mittaa oikein.	Kaasupussissa liian vähän kaasua.	Biobasic tarvitsee noin 9 litraa kaasua yhteen mittaukseen. Harvennetaan biobasicin mittaavaliä.
	Raikkaan ilman sininen letku ei ole paikallaan.	Kiinnitetään letku paikalleen.
	Laitevika	Otetaan yhteyttä Sarlin Oy huoltoon.

## LIITE 4: TURVALLISUUSOHJEET

TURVALLISUUSOHJEET	
1	<p>ENNEN LAITTEISTOTILAAN ASTUMISTA.</p> <p>VARMISTA, ETTÄ LAITTEISTOTILAN YMPÄRISTÖSSÄ EI OLE RÄJÄHDYKSEN AIHEUTTAVIA SYTTYMISLÄHTEITÄ.</p> <p>VARMISTA, ETTÄ LAITTEISTOTILAN LÄHELLÄ EI OLE ASIATTOMIA.</p> <p>VÄLTÄ YKSIN TYÖSKENTELYÄ.</p> <p>TARKISTA, ETTÄ LAITTEISTOTILAN ILMANVAIHTO ON PÄÄLLÄ.</p> <p>TARKISTA RIKKIVETY- , HÄKÄ- JA METAANIHÄLYTTIMEN TOIMIVUUS.</p> <p>KANNA MUKANASI TOIMIVIA RIKKIVETY- , HÄKÄ- JA METAANIHÄLYTTIMIÄ.</p> <p>KÄYTÄ KONEELLISTA HENGITYSSUOJAINTA, JOS AUKAISET PERKOLAATTISÄILIÖN MITTAUSAUKON.</p> <p>KÄYTÄ SUOJAHANSKOJA, SUOJALASEJA JA SUOJAAATTEITA.</p>
2	<p>ENNEN LAITTEISTON AVAAMISTA</p> <p>TUULETA LAITTEISTO</p> <p>VARMISTA, ETTÄ LAITTEISTOTILASSA EI OLE RÄJÄHDYKSEN AIHEUTTAVIA SYTTYMISLÄHTEITÄ.</p>
3	<p>MITTAUSAUKKOA AVATTAESSA</p> <p>KÄÄNNÄ KORKKIA HITAASTI JOTTA JÄRJESTELMÄÄN MAHDOLLISESTI SYNTYNYT KAASU VAPAUTUU HITAASTI.</p>

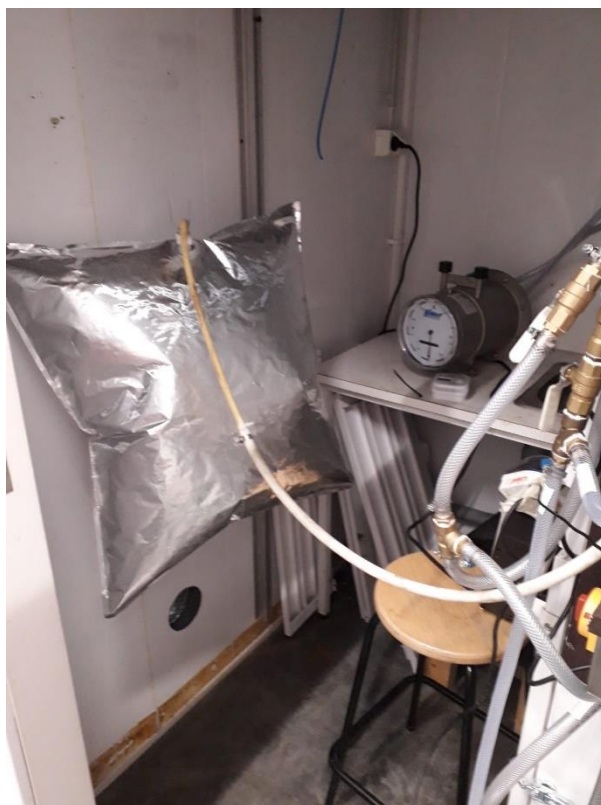
## LIITE 5: VAARATILANTEEN TOIMENPITEET

VAARATILANTEEN TOIMENPITEET	
KAASUVUOTO	
1	VARMISTA OMA TURVALLISUUTESI ENNEN KUIN RYHDYT PELASTUSTOIMIIN. KÄYTÄ HENKILÖSUOJAIMIA. ÄLÄ PELASTA YKSIN.
2	POISTA ALTISTUNEET HENKILÖT TILASTA VÄLITTÖMÄSTI RAITTIISEEN ILMAAN
3	SOITA /PYYDÄ SOITTAMAAN HÄTÄKESKUKSEEN MIKÄLI POTILAILLA ON HENGITYSVAIKEUKSIA TAI TAJUNNANMENETYSTÄ.
4	JOS POTILAALLA ON HENGITYSVAIKEUKSIA, ANNA TEKOHENGITYSTÄ, JOKA ON TEHOKKAIN PALKEELLA. JOS MAHDOLLISTA, ANNA HAPPEA. JOS SYDÄN ON PYSÄHTYNYT, ANNA PAINANTAEVITYSTÄ. TOIMITA POTILAS ENSIAPUASEMALLE LÄÄKÄRINTUTKIMUSTA VARTEN.
5	ALOITA LAITTEISTOTILAN JA LAITTEISTOTILAN YMPÄRÖIVÄN TILAN TUULETTAMINEN.

## LIITE 6: KUVIA LAITTEISTOSTA



Kuva 23. Kuivamädätyslaitteisto. (Paukkonen, 2019.)



Kuva 24. Kuivamädätyslaitteisto. (Paukkonen, 2019.)